



Universidade Estadual de Campinas
Faculdade de Engenharia Química

SÉRGIO RODRIGUES

**“ANÁLISE ESPECTRAL DE UMA SÉRIE HISTÓRICA DE DANOS SOBRE UMA
REDE SUBTERRÂNEA DE DISTRIBUIÇÃO DE GÁS NATURAL EM REGIÕES
METROPOLITANAS NO ESTADO DE SÃO PAULO”**

***“SPECTRAL ANALISYS OF A REAL THIRD PARTY EXCAVATION DAMANGES
TIME SERIES DATA IN A NATURAL GAS DISTRIBUTION NETWORK IN
METROPOLITAN AREAS”***

CAMPINAS

2012



Universidade Estadual de Campinas
Faculdade de Engenharia Química

SÉRGIO RODRIGUES

**“ANÁLISE ESPECTRAL DE UMA SÉRIE HISTÓRICA DE DANOS SOBRE UMA
REDE SUBTERRÂNEA DE DISTRIBUIÇÃO DE GÁS NATURAL EM REGIÕES
METROPOLITANAS NO ESTADO DE SÃO PAULO”**

Orientador: Prof. Dr. Flávio Vasconcelos da Silva

***“SPECTRAL ANALYSIS OF A REAL THIRD PARTY EXCAVATION DAMAGES
TIME SERIES DATA IN A NATURAL GAS DISTRIBUTION NETWORK IN
METROPOLITAN AREAS”***

Dissertação de Mestrado apresentada à Faculdade de
Engenharia Química da Universidade Estadual de Campinas, como parte dos requisitos exigidos para a
obtenção do título de Mestre em Engenharia Química, área de concentração de Sistemas de Processos
Químicos e Informática.

*Master Dissertation presented to School of Chemical
Engineering of the University of Campinas to obtain the M.S. grade in Chemical Engineering, concentration
area Chemical Process Systems and Informatics.*

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE À VERSÃO FINAL DA
DISSERTAÇÃO DEFENDIDA PELO ALUNO SÉRGIO
RODRIGUES E ORIENTADO PELO PROF. DR. FLÁVIO
VASCONCELOS DA SILVA

Assinatura do orientador

CAMPINAS
2012

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA E ARQUITETURA - BAE - UNICAMP

R618a Rodrigues, Sérgio
Análise espectral de uma série histórica de danos sobre uma rede subterrânea de distribuição de gás natural em regiões metropolitanas no estado de São Paulo / Sérgio Rodrigues. --Campinas, SP: [s.n.], 2012.

Orientador: Flávio Vasconcelos da Silva.
Dissertação de Mestrado - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Química.

1. Gás natural. 2. Fourier, Análise de. I. Silva, Flávio Vasconcelos da, 1971-. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Química. III. Título.

Título em Inglês: Spectral analysis of a real third party excavation damages time series data in a natural gas distribution network in metropolitan areas

Palavras-chave em Inglês: Natural gas, Fourier Analysis

Área de concentração: Sistemas de Processos Químicos e Informática

Titulação: Mestre em Engenharia Química

Banca examinadora: Jones Erni Schmitz, Luiz Carlos Bertevello

Data da defesa: 21-11-2012

Programa de Pós Graduação: Engenharia Química

Folha de aprovação

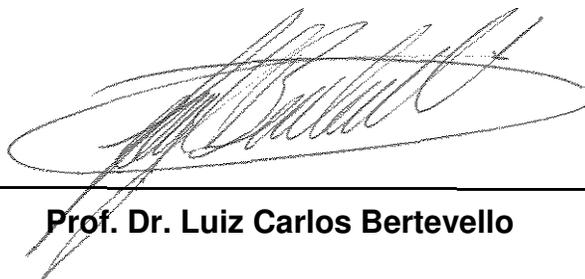
Dissertação de Mestrado defendida por Sérgio Rodrigues e aprovada em 21 de novembro de 2012 pela banca examinadora constituída pelos doutores:



Prof. Dr. Flávio Vasconcelos da Silva- Orientador



Prof. Dr. Jones Erni Schmitz



Prof. Dr. Luiz Carlos Bertevello

RESUMO

Neste trabalho foi utilizada uma série histórica de dados reais de danos sofridos na rede de distribuição de gás natural da concessionária Comgás, em sua área de concessão no estado de São Paulo abrangendo 177 municípios das regiões metropolitanas de São Paulo, Campinas, Baixada Santista e Vale do Paraíba. Com a análise desses dados foi observado que a ocorrência de danos na rede subterrânea de distribuição de gás natural é composta por harmônicas de diferentes frequências e amplitudes. Através da aplicação da transformada de Fourier a série histórica de dados de danos, identificou-se a presença de quatro harmônicas e seus respectivos períodos e magnitudes. De posse desses coeficientes de Fourier aplicou-se a eles a série de Fourier e construiu-se um modelo matemático que representou a função dano com um intervalo de confiança de 94% tornando assim possível prever sua intensidade no domínio do tempo.

Palavras chave: Fourier, Gás Natural, Danos, Análise de espectro.

ABSTRACT

This study used a real third party excavation damages time series data on a natural gas distribution network that belongs to Comgás in your concession area, Brazil, São Paulo state with 177 cities included in metropolitan areas as São Paulo, Campinas, Santos and Vale do Paraíba, demonstrates that this occurrence is droved by harmonic or cycled forces with different frequencies am magnitudes. Due to the application of Fourier transform at the historical damages time series data there was an identification of four harmonic forces and your periods and magnitudes. With this Fourier coefficients identified was applied to a Fourier series to model the third party damage function in time domain. This model gets a 94% of confidential interval and becomes able to prevent damages or time periods with more incidences of damages.

Keywords: Fourier, Natural gas, third party damage, Spectral analysis.

AGRADECIMENTOS

Á Deus que garante e suporta todas as verdades.

À minha esposa por me incentivar e me tornar uma pessoa completa.

Aos meus filhos por darem um novo e grato valor à minha vida.

Aos meus pais que apesar das adversidades e da falta de oportunidades proporcionaram aos seus filhos estudo de qualidade.

Ao meu sogro e minha sogra (*em memória*) por serem meus segundos pais.

Ao meu irmão e cunhada por oferecerem suporte quando necessitei.

Aos meus familiares que formam e sustentam a nossa base de valores.

A Comgás, aos meus superiores e meus colegas de trabalho pela oportunidade.

A todos os professores e funcionários da Faculdade de Engenharia Química que me acompanham desde a graduação e pela oportunidade de continuar os meus estudos.

Ao Prof. Dr. Flavio Vasconcelos da Silva pela orientação.

Enfim, a todos que mesmo não sendo citados, estiveram envolvidos com a realização deste trabalho, os meus sinceros agradecimentos.

“Sessenta anos atrás eu sabia tudo, hoje sei que nada sei. A educação é o descobrimento progressivo da nossa ignorância.”
William James Durant.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1: Subsolo congestionado, fonte: (FARIA; TECHNE, 2009)..... | 15 |
| Figura 2: Utilização do subsolo, fonte: (POR BAIXO DA TERRA, 2011)..... | 16 |
| Figura 3: Adaptado de caminho do gás natural, fonte: (COMGAS – caminho GN, 2009) . | 18 |
| Figura 4: Gás natural associado, fonte: (PETROBRAS, 2010)..... | 19 |
| Figura 5: Gás natural não associado, fonte: (PETROBRAS, 2010)..... | 20 |
| Figura 6: Reservas provadas, fonte: (BP GLOBAL STATISTICS, 2008). | 23 |
| Figura 7: Visão panorâmica do Projeto GNL de Pecém, mostrando o navio regaseificador Golar Spirit , fonte (ANP, 2010). | 25 |
| Figura 8: Gasodutos em estudo, fonte: (GASNET, 2009)..... | 26 |
| Figura 9: Gasodutos em construção, fonte: (GASNET, 2009)..... | 27 |
| Figura 10: Gasodutos em operação, fonte: (GASNET, 2009)..... | 28 |
| Figura 11: Distribuidoras de gás natural, fonte: (GASNET, 2009)..... | 30 |
| Figura 12: Fluxo da rede de distribuição, fonte: (FOSSA et al., 2010)..... | 31 |
| Figura 13: Rede de baixa pressão, fonte: (COMGÁS – RIP, 2009)..... | 32 |
| Figura 14: Rede de média pressão, fonte: (COMGÁS – RIP, 2009). | 33 |
| Figura 15: Distribuição individual, fonte: (COMGAS – RIP, 2009). | 34 |
| Figura 16: Distribuição coletiva, fonte: (COMGÁS – RIP, 2009)..... | 35 |
| Figura 17: Adaptado de Cadastro de rede fonte: (COMGAS - PPD, 2011)..... | 37 |
| Figura 18: Geo radar, GPR, fonte: (ABRATT - MND, 2008). | 38 |
| Figura 19: <i>Pipe locator</i> , fonte, (ABRATT - MND, 2008). | 39 |
| Figura 20: Escavação à vácuo, fonte: (ABRATT - MND, 2008)..... | 40 |
| Figura 21. Adaptado de funções senoidais e sua somatória, fonte: (STOFFER, 1991). | 44 |
| Figura 22: Adaptado de curva da função co-seno (ABERDEEN, 2008) | 45 |
| Figura 23: Função periódica, fonte: (ZILL; CULLEN, 2009). | 49 |
| Figura 24: Exemplo de periodograma de uma função..... | 51 |
| Figura 25: Representação gráfica do efeito aliasing..... | 52 |
| Figura 26: Uso da transformada de Fourier..... | 53 |
| Figura 27: Uso das séries de Fourier | 54 |
| Figura 28: Área de concessão da Comgás | 55 |
| Figura 29: Fornecimento, transmissão e distribuição de GN. | 56 |
| Figura 30: Excel utilizado para efetuar a transformada de Fourier. | 59 |
| Figura 31: Excel exemplo do cálculo de magnitude..... | 60 |
| Figura 32: Excel exemplo do cálculo do período. | 60 |
| Figura 33: Aplicação de a função solver do Excel. | 62 |
| Figura 34: Periodograma dos danos a rede Comgás. | 68 |
| Figura 35: Periodograma válido dos danos à rede..... | 70 |
| Figura 36: Representação gráfica, harmônicas dos danos..... | 74 |
| Figura 37: Modelo, danos a rede e intervalo de confiança. | 78 |
| Figura 38: Modelo, danos a rede e harmônicas individuais. | 78 |
| Figura 39: Comportamento futuro do modelo..... | 79 |
| Figura 40: H1 e H2 sobre comportamento futuro..... | 81 |
| Figura 41: Modelo futuro sem H1. | 83 |

| | |
|--|----|
| Figura 42: Modelo futuro sem H1 com R_0 , offset corrigido em P3. | 86 |
| Figura 43: Modelo futuro sem e com H1 com R_0 , offset corrigido em P3 e P4..... | 88 |
| Figura 44: Modelo de danos corrigido para dados futuros..... | 88 |
| Figura 45: Adaptado de Variação percentual do PIB, países da zona do euro, fonte: (BBC NEWS, 2011). | 90 |
| Figura 46: Adaptado de ciclos econômicos (RODRIGO OCTAVIO MARQUES DE ALMEIDA, 2009) | 93 |
| Figura 47: Comprovação de hipótese da existência de harmônicas. | 94 |
| Figura 48: Possibilidade de continuidade..... | 96 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 1: Classificação do petróleo..... | 19 |
| Tabela 2: Composição típica do gás natural..... | 20 |
| Tabela 3: Propriedades do gás natural..... | 21 |
| Tabela 4: Participação setorial do gás natural. | 23 |
| Tabela 5: Distribuição percentual por estado - Reservas de gás natural. | 24 |
| Tabela 6: Matriz energética brasileira em 2007. | 25 |
| Tabela 7: Incidentes em distribuição..... | 36 |
| Tabela 8: Danos normalizados, Comgás 2003 – 2006..... | 63 |
| Tabela 9: Danos normalizados, Comgás 2007 – 2010..... | 63 |
| Tabela 10: Transformada de Fourier, danos Comgás, Ciclos 1-32..... | 65 |
| Tabela 11: Transformada, de Fourier, danos Comgás, Ciclos 33-63..... | 66 |
| Tabela 12: Periodograma dos danos a rede Comgás..... | 67 |
| Tabela 13: Harmônicas de maior magnitude de danos à rede Comgás..... | 69 |
| Tabela14: Harmônicas de maior amplitude, danos a rede..... | 71 |
| Tabela 15: Séries de Fourier, harmônicas dos danos a rede, ciclos 1-32..... | 72 |
| Tabela 16: Séries de Fourier, harmônicas dos danos a rede, ciclos 33-64..... | 73 |
| Tabela 17: Melhoria dos parâmetros, harmônicas dos danos a rede..... | 75 |
| Tabela 18: Modelagem dos danos a rede, Jan 2003 – Ago 2005..... | 76 |
| Tabela 19: Modelagem dos danos a rede, Set 2005 – Abr 2008..... | 77 |
| Tabela 20: Modelagem dos danos para valores futuros..... | 80 |
| Tabela 21: Modelagem dos danos para valores futuros sem H1..... | 82 |
| Tabela 22: Valores médios da função dano conforme o período..... | 84 |
| Tabela 23: Modelo futuro sem H1 com R_0 , offset corrigido em P3..... | 85 |
| Tabela 24: Modelo futuro sem e com H1 com R_0 , offset corrigido em P3 e P4..... | 87 |

ÍNDICE ANALÍTICO

| | | |
|--------|--|----|
| 1 | Introdução..... | 15 |
| 1.1 | A hipótese a ser verificada..... | 17 |
| 1.2 | Objetivos..... | 17 |
| 2 | Fundamentação teórica..... | 17 |
| 2.1 | Origem do gás natural..... | 18 |
| 2.2 | Composição e características do gás natural..... | 20 |
| 2.3 | Aplicação..... | 21 |
| 2.3.1 | Residências..... | 21 |
| 2.3.2 | Comércio..... | 22 |
| 2.3.3 | Indústria..... | 22 |
| 2.4 | As fontes de gás natural no mundo..... | 23 |
| 2.5 | As fontes de gás natural no Brasil..... | 24 |
| 2.6 | O gás natural na matriz energética brasileira..... | 25 |
| 2.7 | Infraestrutura de transporte..... | 25 |
| 2.8 | Infraestrutura de distribuição..... | 29 |
| 2.8.1 | Distribuição residencial..... | 32 |
| 2.9 | Danos a rede de distribuição de gás natural..... | 36 |
| 2.10 | Técnicas de prevenção de danos..... | 37 |
| 2.10.1 | Cadastro..... | 37 |
| 2.10.2 | GPR, Ground penetrating radar, Geo radares..... | 38 |
| 2.10.3 | <i>Pipe locator</i> , localização de tubos..... | 39 |
| 2.10.4 | Escavação a vácuo..... | 40 |
| 2.11 | Importância de prevenção de danos e sua modelagem..... | 41 |
| 3 | Revisão bibliográfica..... | 41 |
| 3.1 | Séries temporais..... | 42 |
| 3.2 | Sazonalidade ou periodicidade..... | 42 |
| 3.3 | Análise espectral..... | 42 |
| 3.4 | Técnicas de Fourier..... | 43 |
| 3.5 | Funções periódicas..... | 44 |
| 3.6 | Soluções periódicas e ciclos limites..... | 45 |
| 3.7 | Funções ortogonais..... | 46 |
| 3.8 | Séries de Fourier..... | 47 |
| 3.9 | Transformada de Fourier..... | 48 |
| 3.10 | Construção do periodograma..... | 51 |
| 3.11 | Teorema de Nyquist - Aliasing ou espelhamento..... | 52 |
| 3.12 | Construção do modelo matemático..... | 53 |
| 3.13 | Processo da análise espectral..... | 53 |
| 4 | Materiais e métodos..... | 54 |
| 4.1 | Área de concessão..... | 54 |
| 4.2 | Sistema de produção, transmissão e distribuição..... | 55 |
| 4.3 | Dados de danos à rede..... | 57 |
| 4.4 | Análise espectral dos danos..... | 58 |
| 4.5 | Transformada de Fourier dos danos..... | 58 |

| | | |
|-----------------|---|-----|
| 4.6 | Periodograma dos danos | 60 |
| 4.7 | Modelagem da função dano | 61 |
| 4.8 | Aderência do modelo a valores futuros | 62 |
| 4.8.1 | Modelagem de dados futuros..... | 62 |
| 5 | Resultados e discussões | 63 |
| 5.1 | Séries de Fourier dos danos | 71 |
| 5.2 | Aderência do modelo a valores futuros | 79 |
| 5.2.1 | Modelagem de dados futuros..... | 79 |
| 6 | Conclusões e sugestões para trabalhos futuros..... | 89 |
| 6.1 | Uma nova hipótese – Fatores econômicos internos e externos..... | 90 |
| 6.2 | Resultados Mensuráveis | 93 |
| 6.2.1 | Confirmação da hipótese | 93 |
| 6.2.2 | Cumprimento dos objetivos..... | 94 |
| 6.2.3 | Resultados extras | 95 |
| 6.3 | Resultados não mensuráveis | 95 |
| 7 | Referencias bibliográficas | 97 |
| Apêndice A..... | | 101 |
| 7.1 | Objectives | 101 |
| 7.2 | Introduction..... | 101 |
| 7.3 | Periodic Function..... | 102 |

1 Introdução

O gás natural é canalizado, o que significa que ele é transportado através de tubulações subterrâneas para as casas, apartamentos, comércios, indústrias e postos de combustível.

A maior parte dos dutos e tubulações no subsolo são bens ativos de empresas públicas ou privadas de saneamento e fornecimento de água, energia elétrica, gás e telecomunicações (FARIA; TECHNE, 2009).

Pertencentes ao município, apenas as redes de iluminação pública, de drenagem e de alimentação dos semáforos. Os detentores de cada um desses sistemas dispõem de bases de cadastro próprias, digitalizadas, relativamente precisas e completas.

Os trabalhos de manutenção e expansão dessas concessionárias geram risco de acidentes em escavações nas áreas mais adensadas e impactos sobre o trânsito e sobre o abastecimento nas proximidades dessas obras.



Figura 1: Subsolo congestionado, fonte: (FARIA; TECHNE, 2009).

O subsolo nas regiões metropolitanas no Brasil e no mundo não é congestionado apenas nas camadas superficiais há vários níveis de ocupação do subsolo com diversidade de propósitos e empresas que o utilizam (ABRATT - MND, 2008), daí a importância em se obter um método de se prever períodos onde a ocorrência desses danos será mais intensa e então agir adequadamente para sua prevenção.

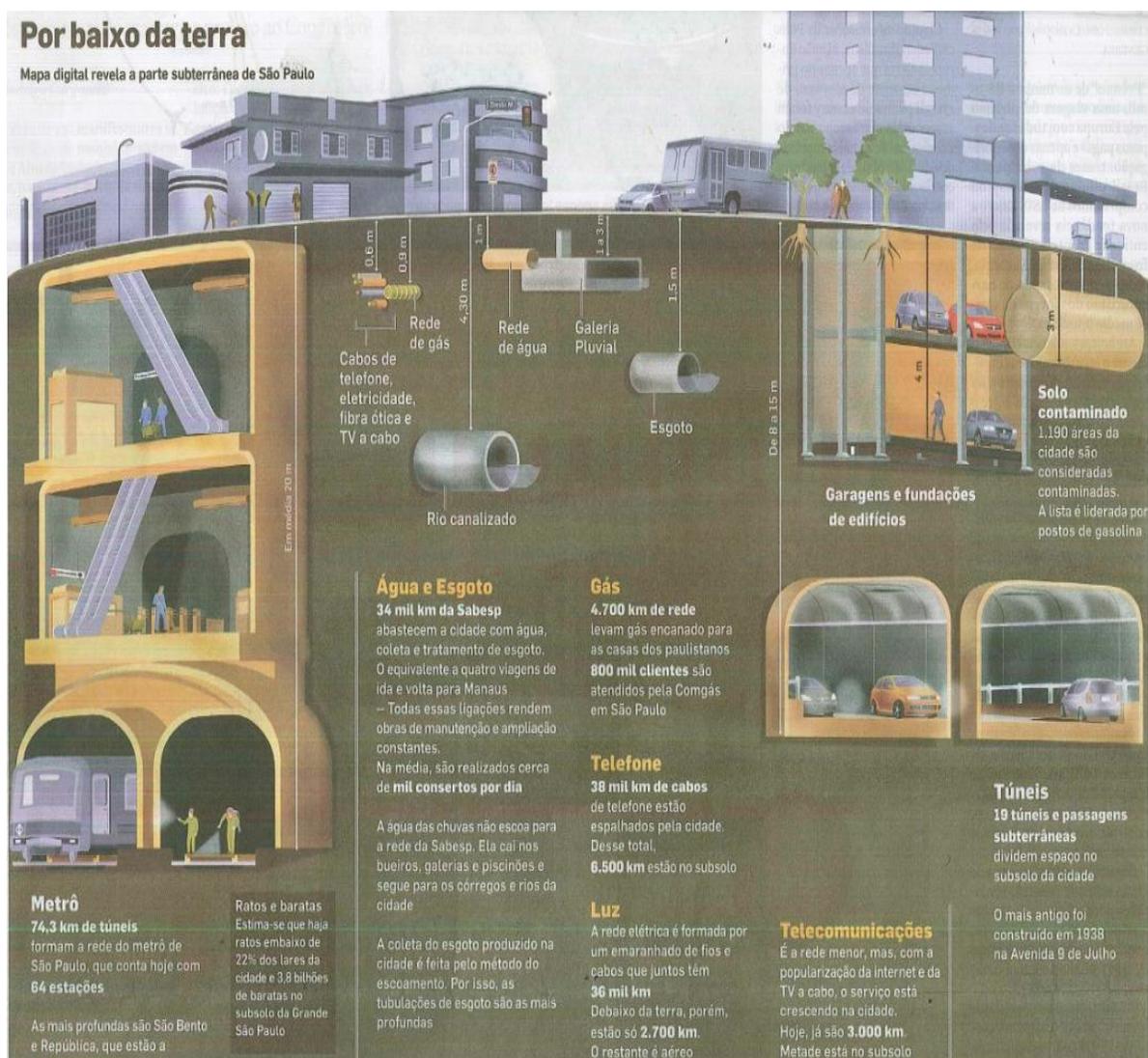


Figura 2: Utilização do subsolo, fonte: (POR BAIXO DA TERRA, 2011).

1.1 A hipótese a ser verificada

“A ocorrência de danos em uma rede subterrânea de distribuição de gás natural localizada numa área de concessão composta de regiões metropolitanas pode ser prevista por um modelo de harmônicas de diferentes frequências e amplitudes”.

1.2 Objetivos

Para verificar a hipótese do modelo harmônico, onde uma série histórica complexa é decomposta em funções seno e cosseno, os objetivos abaixo devem ser cumpridos.

1. Aplicar a transformada de Fourier à série de danos da concessionária Comgás.
2. Montagem do periodograma¹ da série, identificando a presença de harmônicas.
3. Reconstrução no domínio do tempo das harmônicas de maior amplitude.
4. Obtenção da função dano como somatória das harmônicas de maior amplitude.
5. Comparação do modelo com a série original num intervalo de confiança de 95%.

2 Fundamentação teórica

O gás natural proveniente de fontes produtoras é transportado por meio de tubulações de alta pressão. Nas unidades chamadas City Gates este recebe o odorante cuja função é alertar pelo olfato a presença de um vazamento de gás natural uma vez que este é inodoro. A partir daí sua rede inicia um processo de redução de pressão e ramificação para atender as diversas necessidades dos consumidores finais.

A figura 3 ilustra de forma lúdica o caminho do gás natural passando pelo (1) poço de extração, (2) estação de tratamento e purificação, (3) estação de compressão e transmissão, (4) estação de transferência de custódia e adição de odorante, (5) rede de distribuição de alta pressão, (6) estação primária de redução de pressão, (7) rede de distribuição de média pressão, (8) estação secundária de redução de pressão e (9) redes de distribuição de média e baixa pressão.

¹ Um gráfico da magnitude da respectiva componente versus seu período de ciclo no tempo.



Figura 3: Adaptado de caminho do gás natural, fonte: (COMGÁS – caminho GN, 2009)

2.1 Origem do gás natural

O gás natural é resultado da transformação de fósseis de animais e plantas, sendo uma fonte de energia totalmente natural. A cerca de 300 milhões de anos, matéria orgânica em decomposição vem se acumulando no subsolo e a aproximadamente 150 milhões de anos já sob o efeito do calor e da pressão do subsolo essa matéria orgânica iniciou seu processo de transformação em petróleo (COMGÁS – origem GN, 2009).

O gás natural é a porção do petróleo (mistura de hidrocarbonetos) que existe na fase gasosa ou em solução no óleo, nas condições de reservatório, e que permanecem no estado gasoso nas condições atmosféricas de pressão e temperatura (PETROBRAS, 2010).

Tabela 1: Classificação do petróleo

| ESTADO | NOMENCLATURA |
|---------|--|
| LÍQUIDO | ÓLEO |
| SÓLIDO | BETUME |
| GASOSO | GÁS NATURAL ASSOCIADO GÁS NATURAL NÃO ASSOCIADO |

Fonte: (PETROBRAS, 2010).

Em muitos campos de petróleo o gás natural se faz presente e nessa situação o gás natural recebe o nome de gás natural associado.

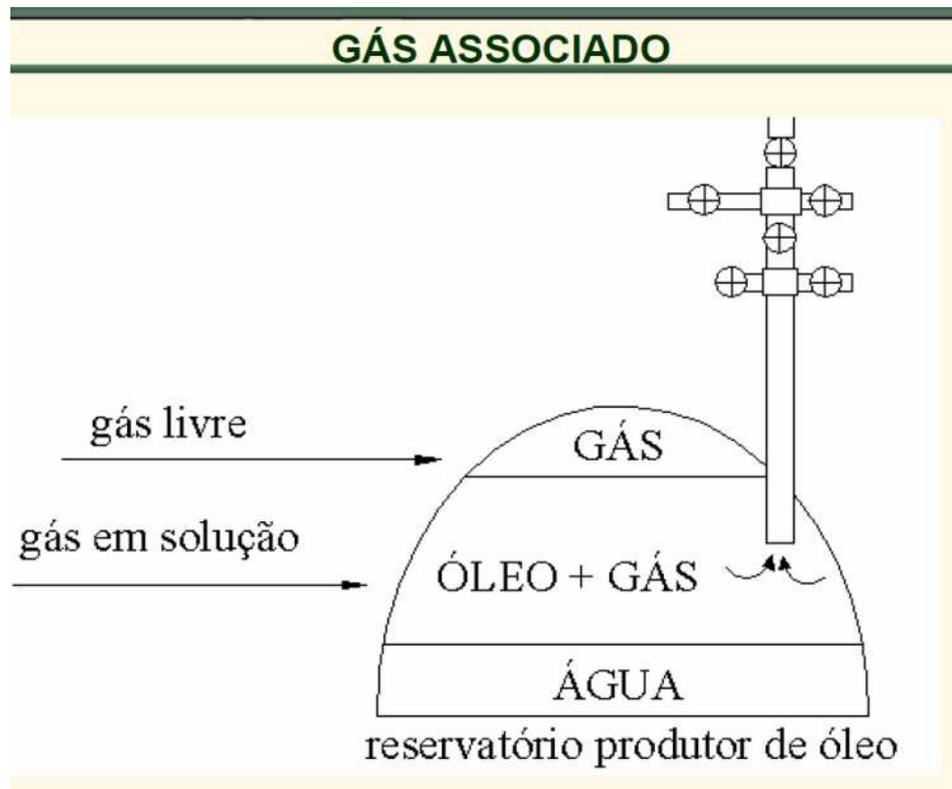


Figura 4: Gás natural associado, fonte: (PETROBRAS, 2010).

Já quando o poço é predominantemente composto de gás natural o mesmo é denominado de gás natural não associado.

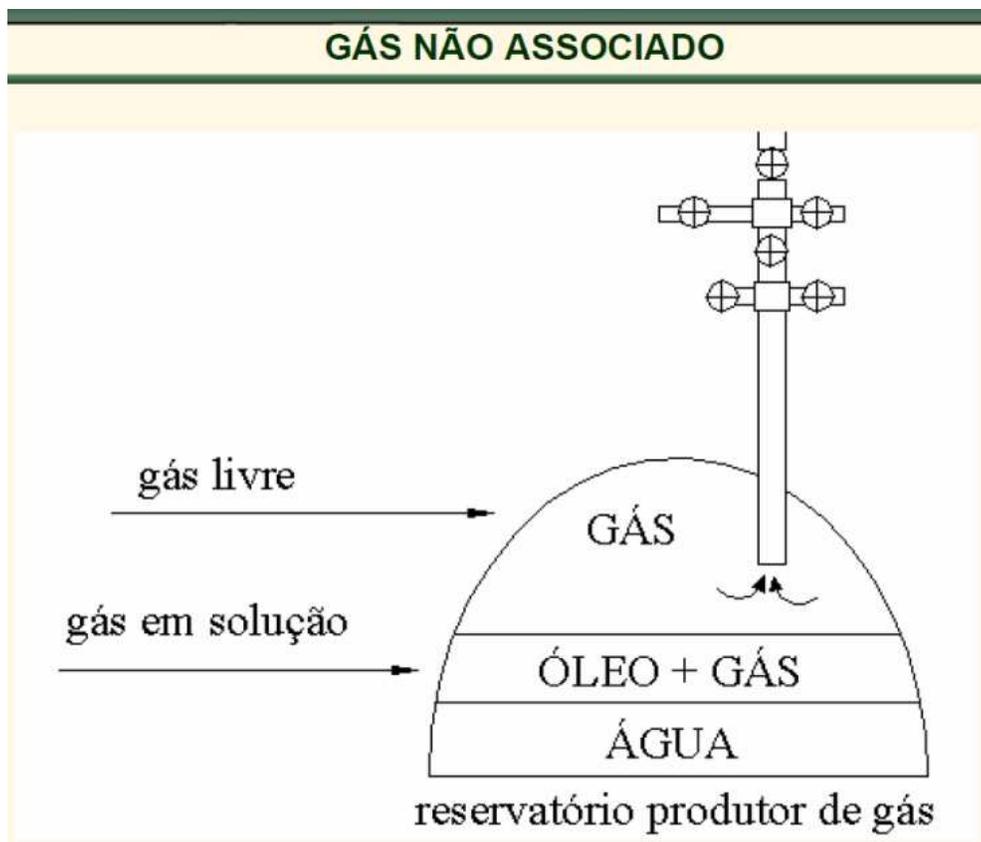


Figura 5: Gás natural não associado, fonte: (PETROBRAS, 2010).

2.2 Composição e características do gás natural

Um combustível limpo que gera baixíssima emissão de poluentes e melhora sensivelmente as condições ambientais, contribuindo para a redução do efeito estufa. Assim é o gás natural, que, devido à sua composição, produz queima limpa e uniforme, com muito menos fuligem, o gás natural tem como composição típica os compostos listados na tabela 2 (COMGÁS – composição GN, 2009).

Tabela 2: Composição típica do gás natural

| ELEMENTO | PERCENTUAL |
|----------|------------|
| Metano | 89,0% |
| Etano | 6,0% |
| Propano | 1,8% |
| C4+ | 1,0% |
| CO2 | 1,5% |
| N2 | 0,7% |

Fonte: (COMGÁS – composição GN, 2009)

Oferece segurança relativa a outros combustíveis pela sua baixa densidade, menor que a do ar, dispersando-se rapidamente na atmosfera em caso de vazamento, não tóxico e de inflamabilidade reduzida, o combustível tem suas propriedades principais que proporcionam sua aplicação com energético listado na tabela 3.

Tabela 3: Propriedades do gás natural

| PROPRIEDADES | VALORES |
|-----------------------------------|---|
| Poder calorífico | > 9400 kcal/m ³ |
| Limite de inflamabilidade | 5-15% em volume |
| Temperatura de ignição espontânea | 540°C |
| Velocidade de chama | 35-50 cm/s |
| Temperatura de chama: | 1.945°C com ar e 2.810°C com oxigênio |
| Ponto de ebulição: | -162°C |
| Ponto de Fulgor: | - 189°C |
| Densidade absoluta: | 0 766 kg/m ³ (a 20°C; 1 atm) |

Fonte: (COMGÁS – composição GN, 2009)

2.3 Aplicação

O gás natural é utilizado em residências, no comércio, em indústrias e veículos e para a geração e co-geração de energia, (COMGÁS – aplicação GN, 2009).

2.3.1 Residências

O crescimento desse mercado ganhou impulso maior nos últimos anos e já conta com mais de um milhão de clientes no setor residencial somando-se os municípios das regiões metropolitanas de Campinas, Santos, Limeira, Piracicaba, São José dos Campos, Jundiaí e São Paulo. O grande crescimento da construção civil no Brasil, ocorrido nos últimos anos, também tem impulsionado o negócio do gás natural, que vem dedicando nos últimos anos a maior parte de seus investimentos para o crescimento deste mercado.

Seu uso é observado em fogões, aquecedores de água, ar condicionado, piso radiante, toalheiro, aquecimento direto, radiador, secadora de roupas, lavadora de roupas, sauna, piscinas, tocha, gerador de energia elétrica e churrasqueira entre outros.

2.3.2 Comércio

O comércio é um grande consumidor em volume e faz uso do gás natural através de uma série de aplicações como, por exemplo, sistemas de ar-condicionado central, geração e co-geração de energia elétrica, produção de vapor, água aquecida, cozinha industrial atendendo a hospitais, hotéis, centros de compras, clubes, escolas e padarias entre outros.

2.3.3 Indústria

O segmento industrial é o que consome o maior volume de gás entre todos os mercados atendidos pela Comgás. Juntas, as fábricas atendidas pela companhia respondem por mais de 70% do volume distribuído. Atualmente, a companhia, entre todos os seus mercados, distribui mais de cinco bilhões de metros cúbicos por ano.

Geograficamente, a região metropolitana da cidade de São Paulo tem um peso significativo no gás direcionado ao setor industrial, respondendo por quase metade do consumo nesse segmento.

Além do uso em processos industriais nos segmentos automobilísticos, alimentos e bebidas, alumínio, química, vidro, têxtil, siderúrgica, borracha, metalúrgica, cerâmica e papel, tabela 4, o gás natural é uma alternativa para a produção de eletricidade, seja em usinas termelétricas ou através de plantas de co-geração.

A co-geração é uma forma eficiente de prover energia. Sendo ela capaz de produzir simultaneamente, e de modo seqüencial, duas ou mais formas de energia a partir do gás natural. Com isso, a co-geração desperta o interesse de centros de compras, hotéis, redes varejistas, centros comerciais, hospitais, entre outros, porque é capaz de produzir energia elétrica, água quente e gelada para o sistema de ar-condicionado.

No mercado de termo geração, a Comgás atende a duas usinas térmicas (Piratininga e Fernando Gasparian), que são despachadas somente mediante determinação do Operador Nacional do Sistema (ONS).

Tabela 4: Participação setorial do gás natural.

| SEGMENTO | CONSUMO |
|-------------------------|---------|
| Químico / petroquímico | 27% |
| Cerâmica | 16% |
| Papel e celulose | 14% |
| Siderurgia | 9% |
| Automotivo / pneumático | 7% |
| Vidros e cristais | 7% |
| Bebidas e alimentos | 6% |
| Metais / fundição | 5% |
| Outros | 4% |
| Têxtil | 4% |
| Eleto/eletrônico | 0% |
| Farmacêutico | 0% |

Fonte: (COMGÁS – aplicação GN, 2009).

2.4 As fontes de gás natural no mundo

O mundo hoje vive a era do gás natural (FOSSA et al., 2010) onde há a tendência de esse insumo energético manter sua importância com perspectiva de um crescimento exponencial de consumo nos próximos 20 anos.

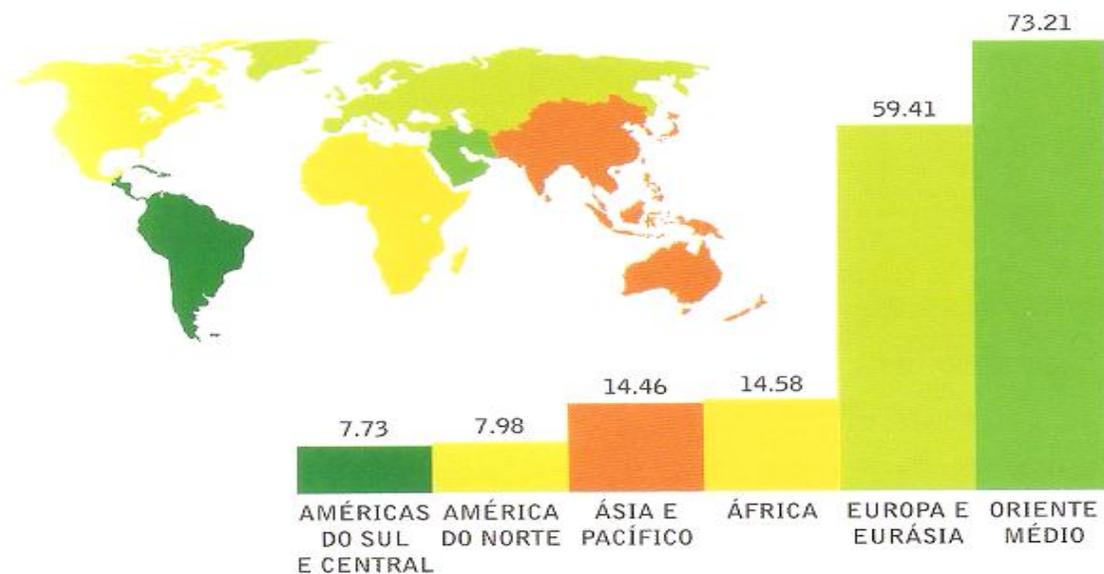


Figura 6: Reservas provadas, fonte: (BP GLOBAL STATISTICS, 2008).

2.5 As fontes de gás natural no Brasil

O Brasil possuía em 2007 reservas provadas de gás natural em torno de 364,9 bilhões de metros cúbicos e há excelentes perspectivas futuras em função das descobertas de gás natural ocorridas entre 2007 e 2008 na Bacia de Campos (FOSSA et al., 2010). A distribuição dessas reservas por estados pode ser vista na tabela 5.

Tabela 5: Distribuição percentual por estado - Reservas de gás natural.

| ESTADO | RESERVAS |
|---------------|-----------------|
| RJ | 47,6% |
| AM | 14,3% |
| SP | 13,3% |
| ES | 10,7% |
| BA | 08,8% |
| RN | 02,8% |
| AL | 01,0% |
| SE | 01,0% |
| CE | 00,3% |

Fonte: (BRASIL ANP, 2008).

O desequilíbrio nas condições de oferta e demanda de gás natural no Brasil, nos últimos anos, aliado às incertezas quanto ao fornecimento do gás boliviano, impôs ao País a necessidade de adoção de alternativas de suprimento, a fim de flexibilizar a oferta de gás e assegurar o fornecimento continuado deste energético aos diferentes segmentos de consumo, deste modo, o Gás Natural Liquefeito (GNL) tornou-se uma importante alternativa (ANP, 2010).

No contexto de restrições à oferta de gás natural no mercado brasileiro e da política de aumento da produção nacional, foram construídos dois terminais de regaseificação para viabilizar a importação de GNL – o que se tornou uma importante opção para aumentar a confiabilidade no suprimento de gás natural no Brasil (ANP, 2010).



Figura 7: Visão panorâmica do Projeto GNL de Pecém, mostrando o navio regaseificador Golar Spirit , fonte (ANP, 2010).

2.6 O gás natural na matriz energética brasileira

O gás natural apesar de sua recente utilização no Brasil, em 2007 já era a quinta principal fonte energética, tabela 7, da matriz brasileira (FOSSA et al., 2010).

Tabela 6: Matriz energética brasileira em 2007.

| ENERGÉTICO | PARTICIPAÇÃO |
|----------------|--------------|
| Petróleo | 27% |
| Cana de Açúcar | 16% |
| Hidráulica | 14% |
| Carvão Vegetal | 9% |
| Gás Natural | 7% |
| Carvão Mineral | 7% |
| Outras Fontes | 6% |
| Urânio | 5% |

Fonte: (FOSSA et al., 2010).

2.7 Infraestrutura de transporte

Relativamente pequena em relação a sua dimensão territorial a malha de transporte do gás natural no Brasil em 2008 era de aproximadamente 2.559 km destinados a distribuir a produção nacional e 3465 km destinados ao transporte de gás natural importado (FOSSA et al., 2010).

Essa malha é concentrada nas regiões sudeste e nordeste, figura 10, onde ficam os grandes pólos consumidores e produtores de gás natural, entretanto há estudos de ampliação dessa malha de gasodutos, figuras 8 e 9, de forma a atender as demais regiões brasileiras que vêm apresentando importante desenvolvimento econômico nos últimos anos (GASNET, 2009).



Arte: Juliana G. Volpi

Figura 8: Gasodutos em estudo, fonte: (GASNET, 2009)



Figura 9: Gasodutos em construção, fonte: (GASNET, 2009).



Arte: Juliana G. Volpi

Figura 10: Gasodutos em operação, fonte: (GASNET, 2009)

2.8 Infraestrutura de distribuição

Vencidas as distâncias entre a região produtora e a região consumidora inicia-se uma nova etapa no processo, a distribuição do gás natural.

A distribuição caracteriza-se por uma rede de gasodutos seguidos de uma crescente redução de pressão e uma capilaridade tal que leve o gás natural à porta do consumidor de forma adequada ao seu uso final.

O Brasil possuía até fevereiro de 2011, 27 distribuidoras de gás natural, figura 11, presentes na maioria dos estados (GASNET, 2009).

Esse modelo de distribuição é semelhante ao modelo de distribuição de energia elétrica aonde estações redutoras de pressão vão reduzindo as mesmas assim como os transformadores reduzem a tensão elétrica.

Uma malha subterrânea de tubos de transmissão de gás se assemelha aos fios dos postes de distribuição de energia elétrica fazendo com que o gás natural chegue à porta dos consumidores de forma adequada ao seu uso.

A figura 12 mostra a alta capilaridade e diversificação de diâmetros e pressões reduzidas em relação às redes de transmissão.

A distribuição inicia no ativo denominado *city-gate* onde é feita a transferência de custódia do gás natural para o distribuidor e esse se encarrega de entregá-lo aos diversos tipos de consumidores conforme suas necessidades (FOSSA et al., 2010).



Figura 11: Distribuidoras de gás natural, fonte: (GASNET, 2009).

GASODUTO DE TRANSMISSÃO - AÇO - 70 - 100 BAR

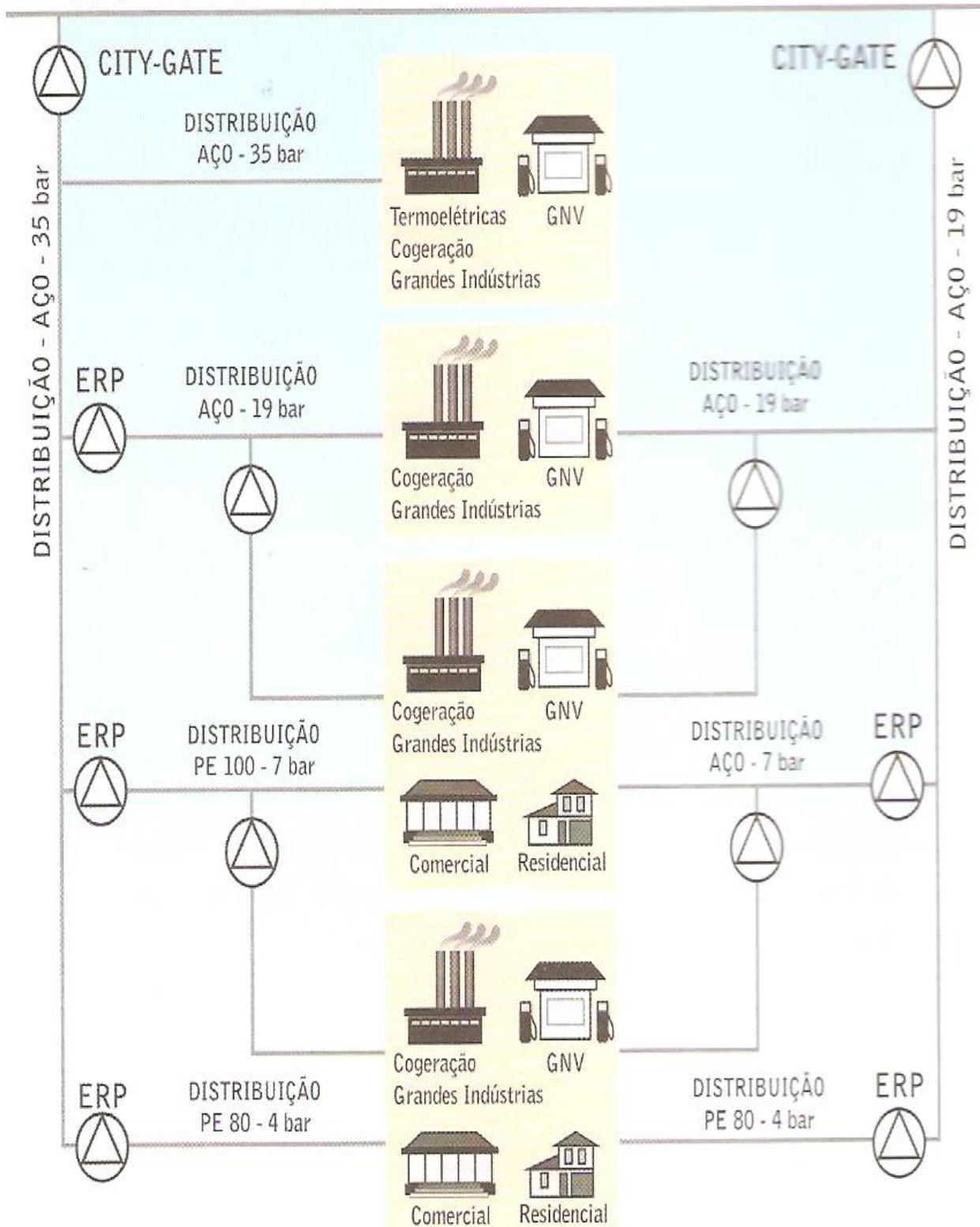


Figura 12: Fluxo da rede de distribuição, fonte: (FOSSA et al., 2010).

2.8.1 Distribuição residencial

Por ser um serviço, o suprimento de gás natural deve ser projetado para garantir o fornecimento e abastecimento de aparelhos a gás (FOSSA et al., 2010). No âmbito residencial a tipologia de distribuição de gases, figuras 13 e 14, é composta por uma rede geral que alimenta ramais individuais de casas podendo ser a redução de pressão individual ou coletiva (COMGÁS – aplicação GN, 2009).

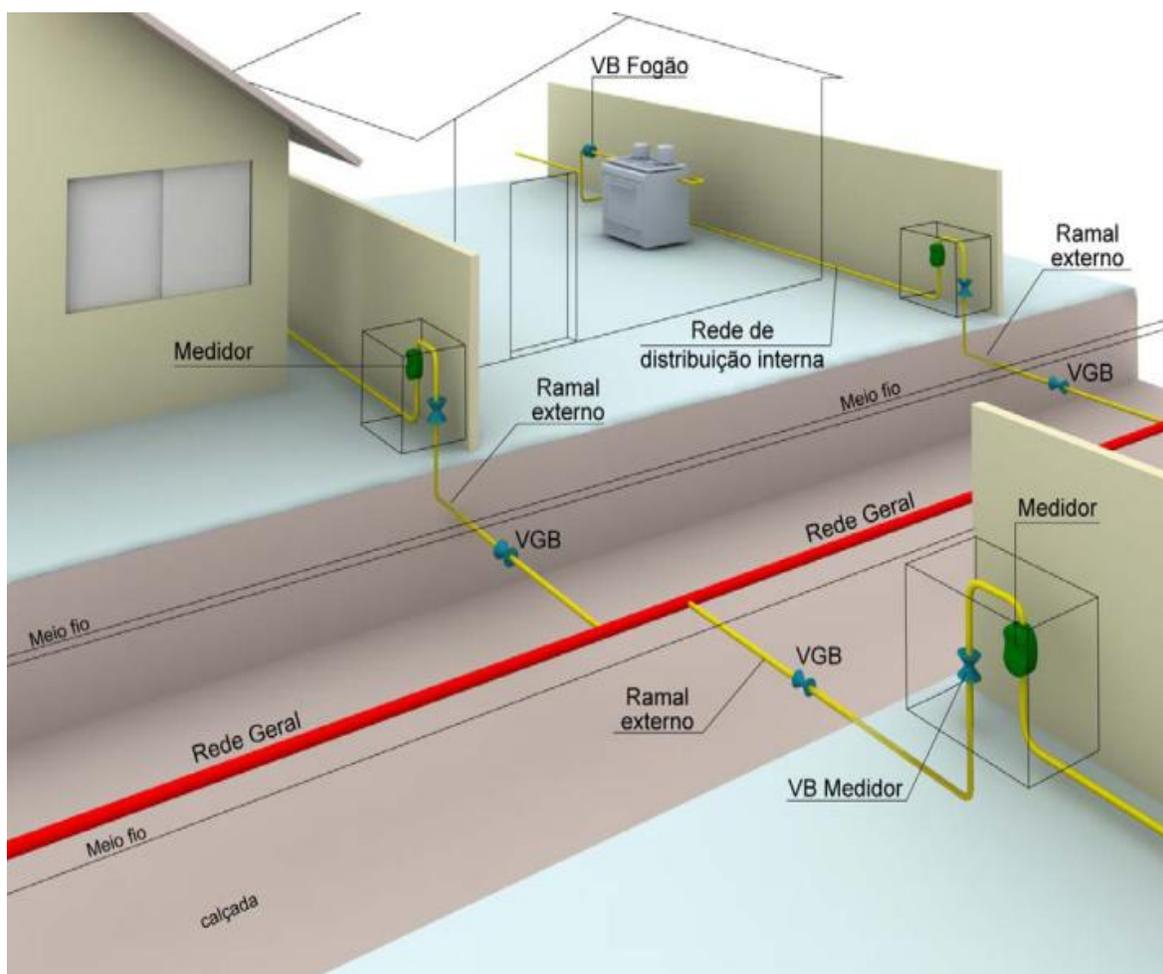


Figura 13: Rede de baixa pressão, fonte: (COMGÁS – RIP, 2009).

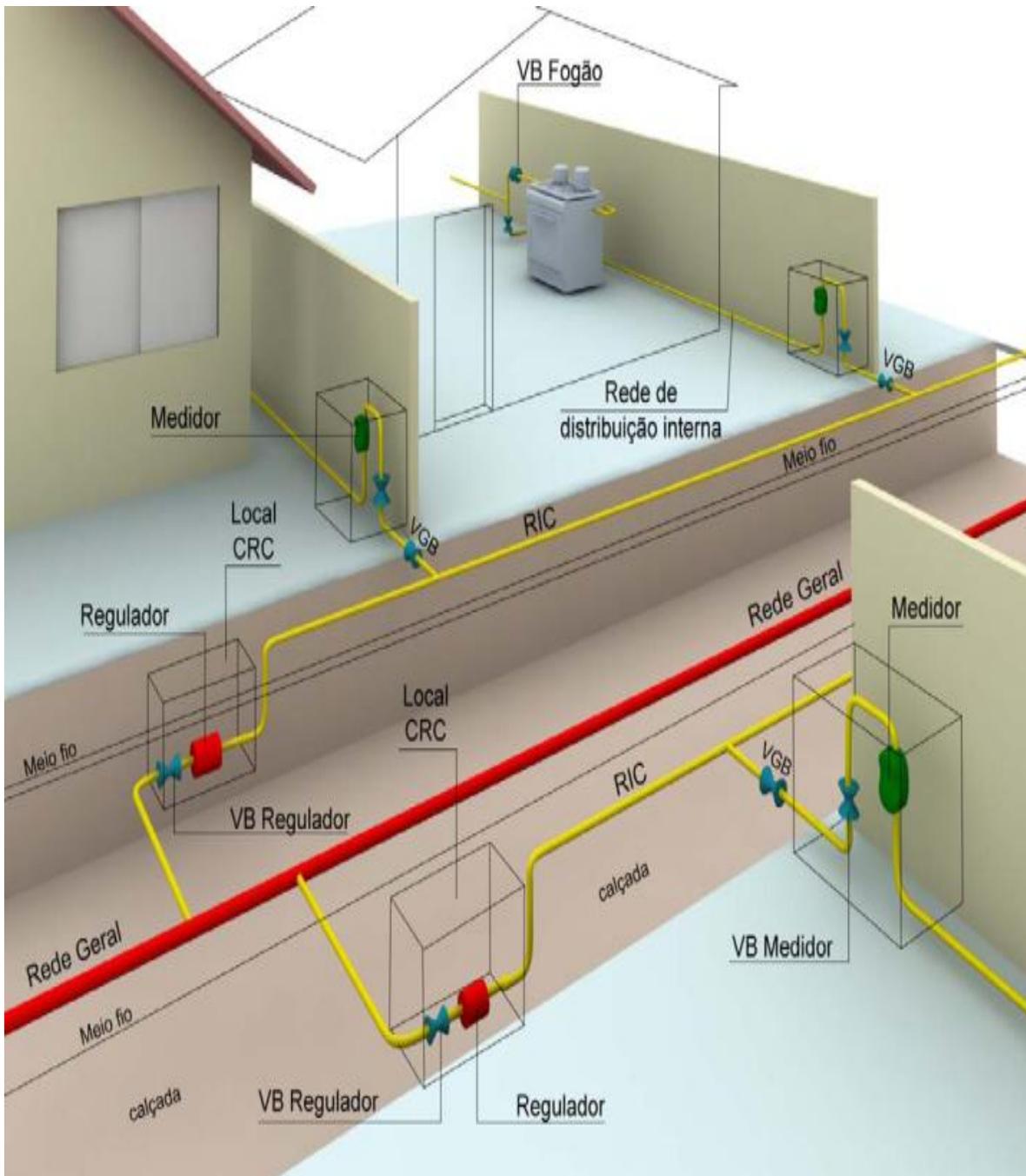


Figura 14: Rede de média pressão, fonte: (COMGÁS – RIP, 2009).

Para edifícios a tipologia de distribuição, figura 16, pode ser coletiva onde uma única tubulação é responsável por entregar o gás natural a diversas unidades habitacionais ou então a distribuição pode ser individualizada, figura 15, onde cada unidade habitacional tem a sua própria tubulação de entrega de gás natural, (FOSSA et al., 2010).

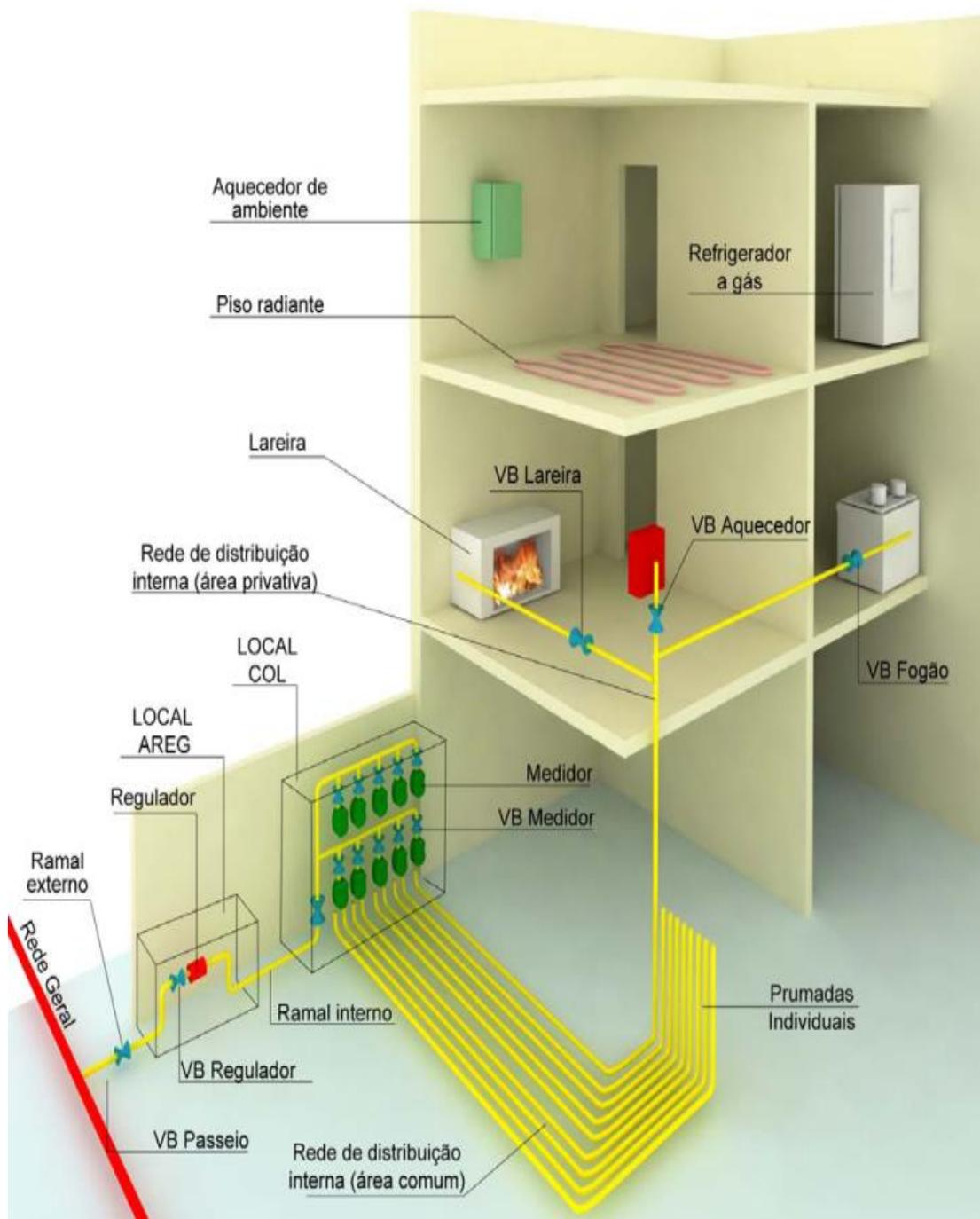


Figura 15: Distribuição individual, fonte: (COMGAS – RIP, 2009).

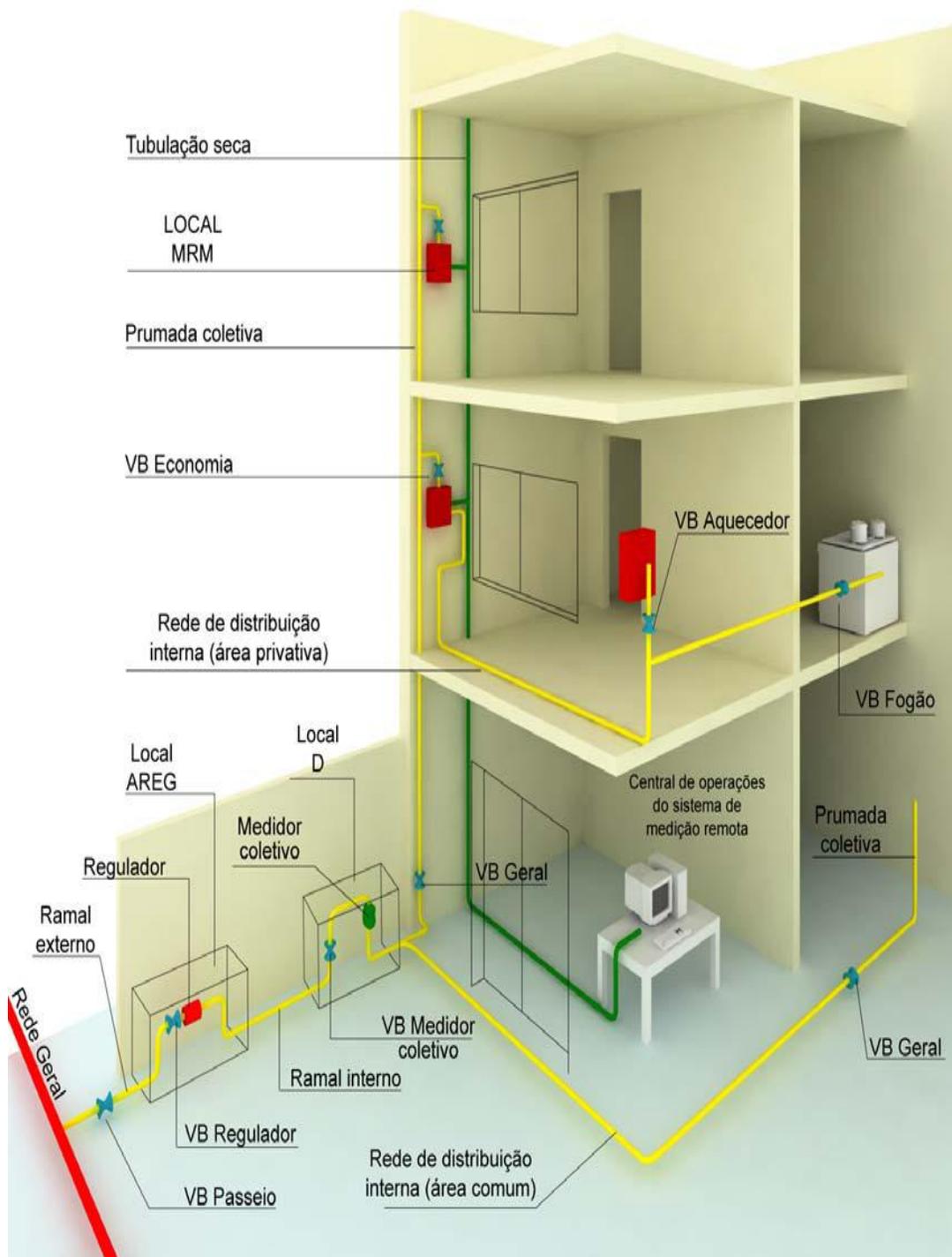


Figura 16: Distribuição coletiva, fonte: (COMGÁS – RIP, 2009)

2.9 Danos a rede de distribuição de gás natural

Dentre as ameaças as quais as redes de gás natural estão sujeitas, as de maior relevância são as causadas por obras de terceiros, por isso as concessionárias distribuidoras do mundo vêm desenvolvendo programas de prevenção de danos (PPD). Essas obras consistem do trabalho de outras concessionárias que compartilham o subsolo das cidades executando suas tarefas de manutenção, renovação e expansão de suas redes de distribuição e que escavam o solo e acabam atingindo as redes uma das outras, na tabela 7 vemos as principais causas de incidentes nas malhas de distribuição de gás natural nos Estados Unidos em 2004.

Tabela 7: Incidentes em distribuição

| EUA, 2004 CAUSA DE INCIDENTES | FREQÜÊNCIA | PERCENTUAL |
|---|-------------------|-------------------|
| Danos por obras de escavação de terceiros | 254 | 30,9 |
| Fogo/explosão como causa primária | 160 | 19,4 |
| Causa desconhecida | 93 | 11,3 |
| Carro, caminhão ou outros veículos não relacionados a atividades de escavação | 90 | 10,9 |
| Miscelânea. | 55 | 6,7 |
| Erros operacionais | 21 | 2,6 |
| Chuvas fortes | 19 | 2,3 |
| Movimentação de terra | 17 | 2,1 |
| Corrosão externa | 15 | 1,8 |
| Juntas | 12 | 1,5 |
| Dano por operação de escavação | 11 | 1,3 |
| Corpo da Tubulação | 10 | 1,2 |
| Raios | 10 | 1,2 |
| Ventos fortes | 9 | 1,1 |
| Mau funcionamento de equipamentos de segurança | 9 | 1,1 |
| Temperatura | 9 | 1,1 |
| Vandalismo | 9 | 1,1 |
| Componentes | 7 | 0,9 |
| Ruptura de tubulação por dano prévio | 3 | 0,4 |
| Ruptura ou vazamento em selos | 3 | 0,4 |
| Perda de revestimento, Ruptura em união | 3 | 0,4 |
| Corrosão interna | 1 | 0,1 |
| Sem informação | 3 | 0,4 |
| Total | 823 | 100,0 |

Fonte: (SIMONOFF; RESTREPO; ZIMMERMAN, 2009)

2.10 Técnicas de prevenção de danos

Nas grandes cidades pode haver uma super ocupação do subsolo, o que causa um “congestionamento”. Assim, pode ocorrer da rede de uma companhia atrapalhar os serviços de ampliação, manutenção e reparos de emergências de outras empresas, é a chamada interferência (COMGAS - PPD, 2011).

2.10.1 Cadastro

A tubulação de gás natural compartilha o subsolo das cidades com as redes de outras companhias, como por exemplo, de água e esgoto, eletricidade, telefonia, TV a cabo e internet. Inicia-se o trabalho com uma inspeção visual acompanhada dos cadastros disponíveis onde se procuram evidencias para comprovar os registros existentes e outros que porventura não estão registrados, como por exemplo, tampas de visita, tubulações de postes entrando no subsolo, tampas de bueiros (COMGAS - PPD, 2011).

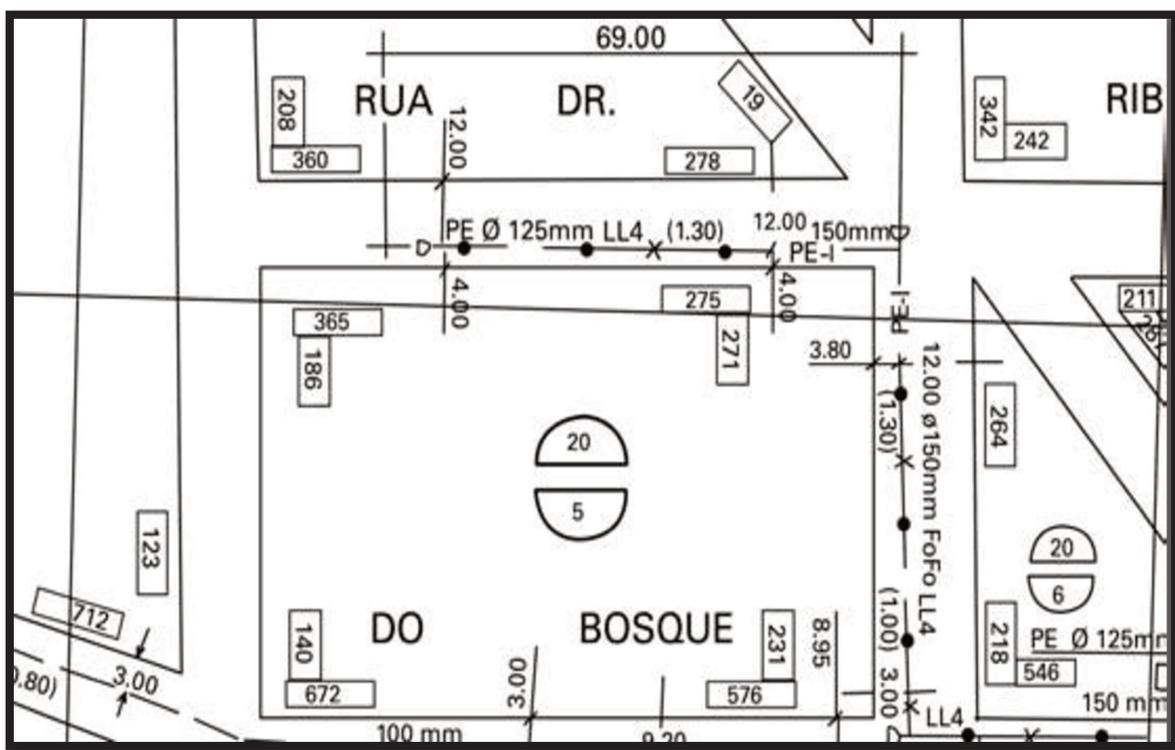
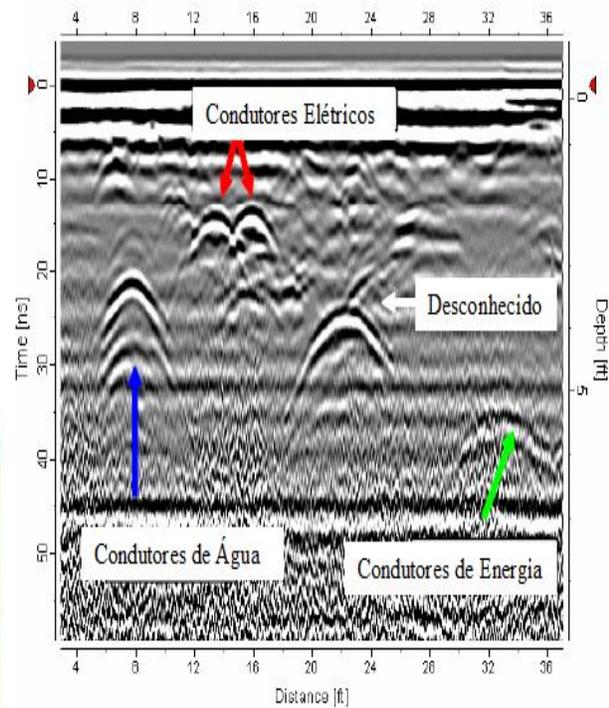


Figura 17: Adaptado de Cadastro de rede fonte: (COMGAS - PPD, 2011)

2.10.2 GPR, Ground penetrating radar, Geo radares

Um geo radar é um aparelho projetado para mapear objetos no subsolo, ele envia ondas eletromagnéticas em direção ao solo e sua antena captura os sinais que se refletem nos objetos e retornam para a superfície onde esses sinais de retorno são utilizados para construir uma imagem desses objetos (ABRATT - MND, 2008).



Tela do GPR

ABRATT

Figura 18: Geo radar, GPR, fonte: (ABRATT - MND, 2008).

A condutividade e a resistividade dos solos pode ser um problema para o uso de GPR, portanto esses valores são importantes quando utilizado esse recurso.

2.10.3 *Pipe locator*, localização de tubos

Um *pipe locator* é um dispositivo desenvolvido para localizar tubulações enterradas no subsolo, utilizam diversas técnicas e varia consideravelmente seu custo (WISEGEEK; SMITH, 2010).

Sua utilização requer mão de obra especializada uma vez que diversas funcionalidades são atribuídas a esses dispositivos, entretanto sempre é necessário antes e depois da análise o acompanhamento de um engenheiro para avaliar o método aplicado.

Esses dispositivos são feitos por empresas especializadas por encomenda ou alugados para esse propósito.



ABRATT

Figura 19: *Pipe locator*, fonte, (ABRATT - MND, 2008).

2.10.4 Escavação a vácuo

Esse método de escavação não destrutivo expõe com segurança tubos, cabos, fibras óticas, redes energizadas e outros serviços enterrados. Baseado em poderosas bombas de vácuo ligadas a mangueiras que suportam alto nível de vácuo o solo é literalmente aspirado para fora (ABRATT - MND, 2008).



ABRATT

Figura 20: Escavação à vácuo, fonte: (ABRATT - MND, 2008).

2.11 Importância de prevenção de danos e sua modelagem

Iniciado em 2003 na Comgás, como o próprio nome diz a abordagem do PPD foca na prevenção dos danos, e esse trabalho preenche a lacuna que é a predição de quando será mais intensa a ocorrência de danos. Não foram encontrados na literatura trabalhos relacionados à predição da ocorrência de danos nem tampouco utilizando a transformada e as séries de Fourier para modelar a função dano.

Devido à importância da prevenção de danos a rede de distribuição de gás natural, pois evita vazamentos com desperdício de produto, interrupção de fornecimento, descarte de gás natural na atmosfera e risco de fogo ou explosão é interessante obter um modelo matemático que descreva a possibilidade de incidência de danos com foco de prevenção tal que ações assertivas sejam aplicadas no domínio do tempo uma vez que essas ações dependem de negociação prévia de orçamento para seu custeio.

Esse modelo preditivo visa reduzir impactos ambientais, aumentar a segurança operacional e minimizar o risco de acidentes à medida que identificam períodos mais propensos a ocorrência de danos e, de modo que, as ações de prevenção e mitigação possam ser eficientemente aplicadas.

3 Revisão bibliográfica

A análise espectral de séries históricas de dados é um recurso amplamente utilizado em diversos campos do conhecimento como, por exemplo, meteorologia, econometria, epidemiologia e engenharia.

A pesquisa bibliográfica não encontrou nenhuma publicação especificamente relacionada ao uso desse recurso para obter um modelo matemático preditivo da incidência de danos a uma rede de distribuição de gás natural e por essa razão esse trabalho contém referências à artigos e pesquisas realizadas em outras áreas do conhecimento.

3.1 Séries temporais

Uma série temporal ou série histórica é uma seqüência de dados obtidos em intervalos regulares de tempo durante um período específico (MORETTIN; TOLOI, 1985).

Este conjunto pode ser obtido através de observações periódicas do evento de interesse como, por exemplo, a temperatura do ar no Município de São Paulo, ou através de processos de contagem como o total mensal de danos a rede de distribuição de gás natural.

Na análise de uma série temporal, primeiramente deseja-se modelar o fenômeno estudado para, a partir daí, descrever o comportamento da série, fazer estimativas e, por último, avaliar quais os fatores que influenciaram o comportamento da série, buscando definir relações de causa e efeito entre duas ou mais séries (LATORRE; CARDOSO, 2001).

Esse trabalho focou em comprovar a hipótese de que a ocorrência de danos é modelável e em obter esse modelo deixando para trabalhos subseqüentes a tarefa de definir relações de causa e efeito e identificação física das variáveis harmônicas do mesmo.

3.2 Sazonalidade ou periodicidade

Na análise de séries temporais a presença de sazonalidade é de difícil interpretação no domínio do tempo, então nesses casos a análise de espectro é uma ferramenta poderosa na identificação da presença de variáveis cíclicas na medida em que trabalha no domínio da freqüência (ABERDEEN, 2008).

3.3 Análise espectral

Numa analogia a análise espectral pode ser comparada a um prisma decompondo um feixe de luz branca do sol no espectro das sete cores do arco-íris (STOFFER, 1991).

Isso ocorre, pois a luz branca que é formada pela combinação do conjunto de sete cores de diferentes comprimentos de onda ao passar pelo prisma tem cada componente refratada por diferentes ângulos revelando-as.

A análise de espectro nada mais é do que decompor uma complexa série temporal de dados em suas componentes cíclicas de formato senoidal, senos e cossenos, revelando seus comprimentos e amplitudes de onda.

Se o termo espectro proporciona uma metáfora para a natureza dessas análises as técnicas de Fourier seriam o prisma para decompor a serie temporal de dados e revelar suas componentes de comportamento senoidal (ABERDEEN, 2008).

3.4 Técnicas de Fourier

Em 1822 o matemático Francês J. L. Fourier estabeleceu uma solução para descrever a condução do calor através da representação de uma série de funções trigonométricas.

Fourier demonstrou que na maioria das vezes uma função periódica pode ser representada pela somatória de uma serie de funções seno e cosseno medido em ciclos por unidade de tempo.

Desde então a análise de Fourier vem sendo utilizada em um número cada vez maior de aplicações em ciências e em engenharia (STOFFER, 1991).

Em análise estatística de series temporal, os métodos de Fourier são utilizados para determinar e analisar a periodicidade ou regularidade dos dados. Essa técnica formaliza o conceito de dependência ou correlação entre pontos da série temporal que se repetem em diferentes momentos do tempo (STOFFER, 1991).

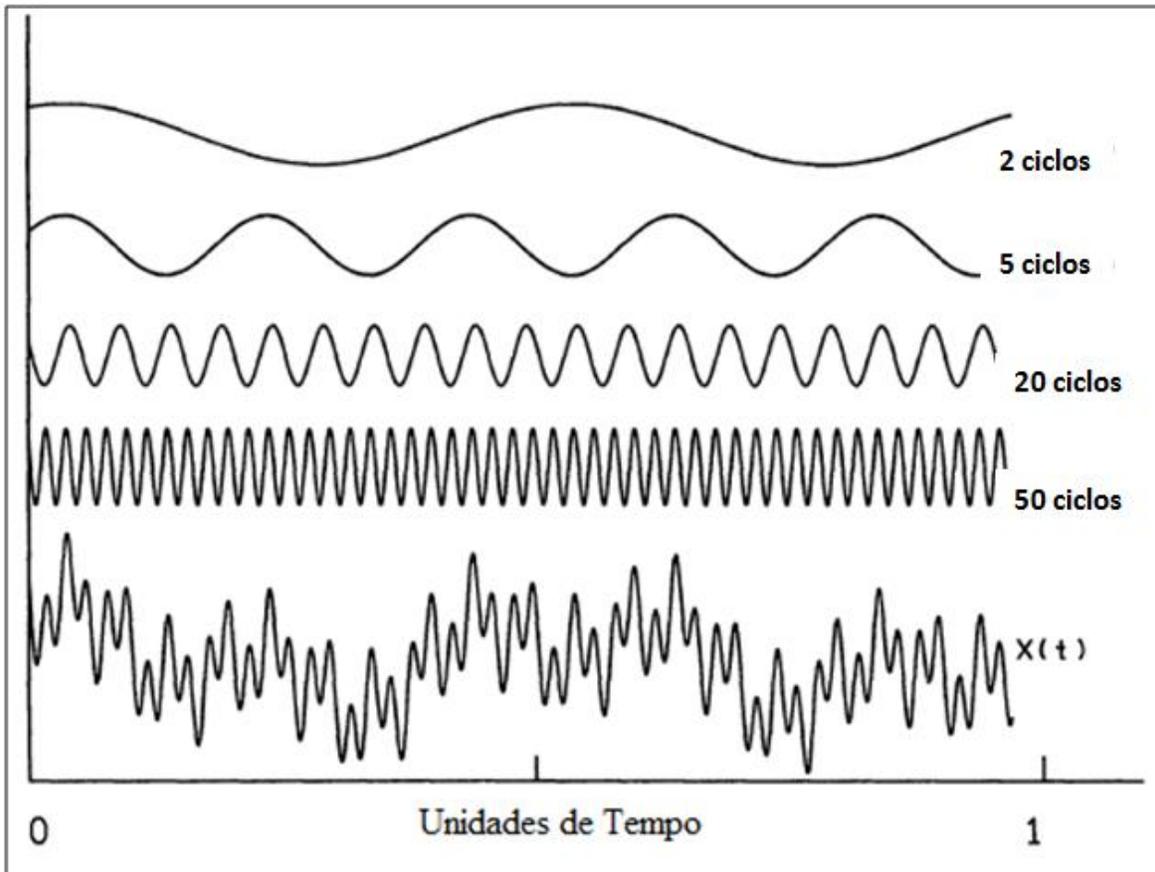


Figura 21. Adaptado de funções senoidais e sua somatória, fonte: (STOFFER, 1991).

3.5 Funções periódicas

Uma função periódica quando descrita por uma função do tempo do tipo $y = f(t)$ onde t representa unidades de tempo, é dita determinística, entretanto quando se tem um componente aleatório além do tempo do tipo $y = f(t, \varepsilon)$ ela é dita estocástica.

Uma função periódica determinística $f(t)$ é uma função que se repete a cada período de tempo T sendo representada matematicamente em termos de uma função trigonométrica como:

$$y = f(t) = R \cos(\omega t - \phi) \quad (3.1)$$

Onde:

ω É a frequência da variação periódica, $2\pi/\text{período}$, T ;

R É a amplitude da variação;

ϕ É a fase que marca o valor inicial da função.

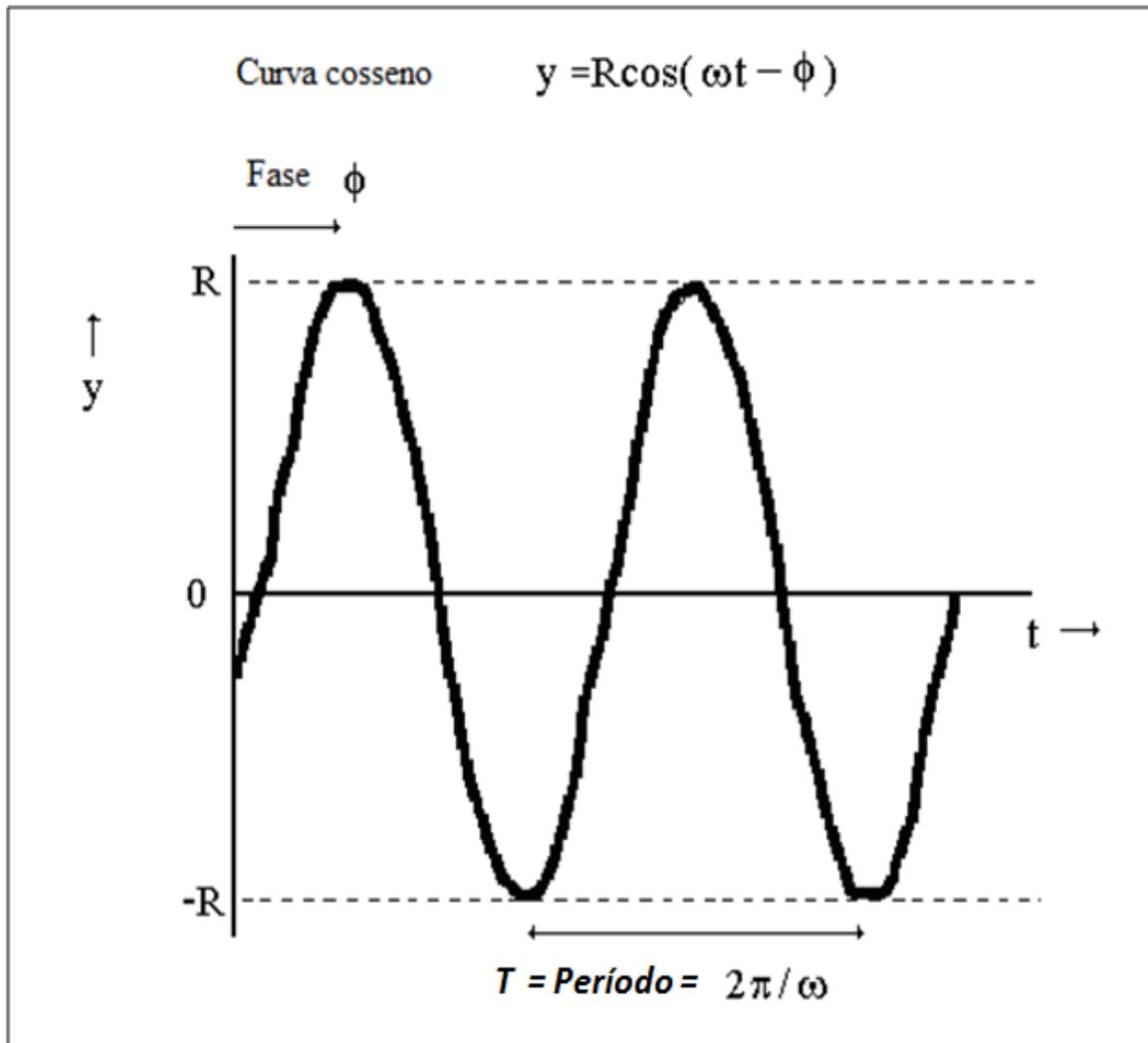


Figura 22: Adaptado de curva da função cosseno (ABERDEEN, 2008) .

3.6 Soluções periódicas e ciclos limites

Sistemas autônomos planos podem conter soluções periódicas e soluções periódicas especiais denominadas ciclos limites (ZILL; CULLEN, 2009).

A análise de pontos críticos pelo uso da linearização pode fornecer informações sobre soluções em sua proximidade bem como percepções sobre fenômenos biológicos, físicos e químicos por eles modelado.

Uma das limitações dessa abordagem ocorre quando os autovalores da matriz Jacobiano forem números imaginários puros, pois não se pode concluir a existência de soluções periódicas próximas ao ponto crítico.

3.7 Funções ortogonais

Nas aplicações da matemática avançada, uma função pode ser considerada uma generalização de um vetor e, portanto, os conceitos vetoriais de produto interno ou escalar e ortogonalidade de vetores podem ser estendidos à resolução dessas funções.

O produto interno ou escalar é um número real, escalar, definido como a soma do produto de suas componentes correspondentes, de maneira similar quando o produto interno de dois vetores é nulo estes são ditos vetores ortogonais, quando o produto interno de duas funções for nulo elas também serão denominadas de funções ortogonais.

$$(f_1, f_2) = \int_a^b f_1(x)f_2(x)dx = 0 \quad (3.2)$$

Da mesma forma quanto temos um conjunto infinito de funções reais dizemos que esse conjunto é ortogonal quando seu produto interno for nulo.

$$(\phi_m, \phi_n) = \int_a^b \phi_m(x)\phi_n(x)dx = 0, m \neq n. \quad (3.3)$$

Dessa forma estamos trabalhando o conceito de resolução de equações diferenciais parciais lineares em um contexto aplicado, ou seja, a expansão de uma função em uma série infinita que é essencialmente uma série de potências de x (ZILL; CULLEN, 2009).

3.8 Séries de Fourier

O matemático Frances Joseph Fourier antecipou a idéia de expandir uma função, f , em uma série de funções trigonométricas, as séries de Fourier são um caso particular das representações em série de uma função fazendo uso de funções ortogonais, porém trigonométricas, (ABERDEEN, 2008).

Seja o conjunto de funções trigonométricas e ortogonais no intervalo $[1, \infty]$ sua representação expandida em uma série ortogonal constituída por funções trigonométricas é:

$$f(t) = R_0 + \sum_{n=1}^{\infty} R_n \cos(\omega_n t - \phi_n) \quad (3.4a)$$

$$y = R_0 + \sum_{n=1}^{\infty} R_n \cos(2\pi(t_n - \phi_n) \setminus T_n) \quad (3.4b)$$

Onde;

R_0 É um “offset” ou valor utilizado para corrigir desvios, valor médio de y .

R_n É a amplitude da variação

ω É a frequência da variação periódica, $2\pi/\text{período}$.

ϕ É a fase que marca o valor inicial da função, avanço ou atraso.

Ou alternativamente a série de Fourier pode ser representada como a soma de senos e cossenos.

$$f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos \omega t + b_n \sin \omega t) \quad (3.5)$$

Onde:

$$a_n = R_n \cos \phi_n$$

$$b_n = R_n \sin \phi_n.$$

$$a_0 = \text{Offset}$$

De posse dos conceitos acima descritos pode-se determinar para a série temporal, $y = f(t)$, representada pela somatória de funções seno e cosseno quais os valores de a_0 , a_n e ω que a represente.

3.9 Transformada de Fourier

Para se determinar os parâmetros de frequência e amplitude para cada uma das funções trigonométricas que compõem as séries de Fourier, faz-se o uso da Transformada de Fourier.

A transformada de Fourier possui três formas alternativas de aplicação, a integral do co-seno, a integral do seno e a forma complexa ou exponencial. A questão de qual delas utilizar fica associada à condição de contorno especificada em zero (ZILL; CULLEN, 2009).

A transformada rápida de Fourier baseia-se no conceito de análise de amostras discretas, f_0, f_1 , etc. de uma função contínua, figura 23, e a forma complexa ou exponencial de uma série de Fourier desempenha um papel importante nessa análise onde o número T é denominado taxa de amostragem ou comprimento do intervalo de amostragem e se f for contínua em t então a amostra de f em T é definida como a função Delta de Dirac (ZILL; CULLEN, 2009).

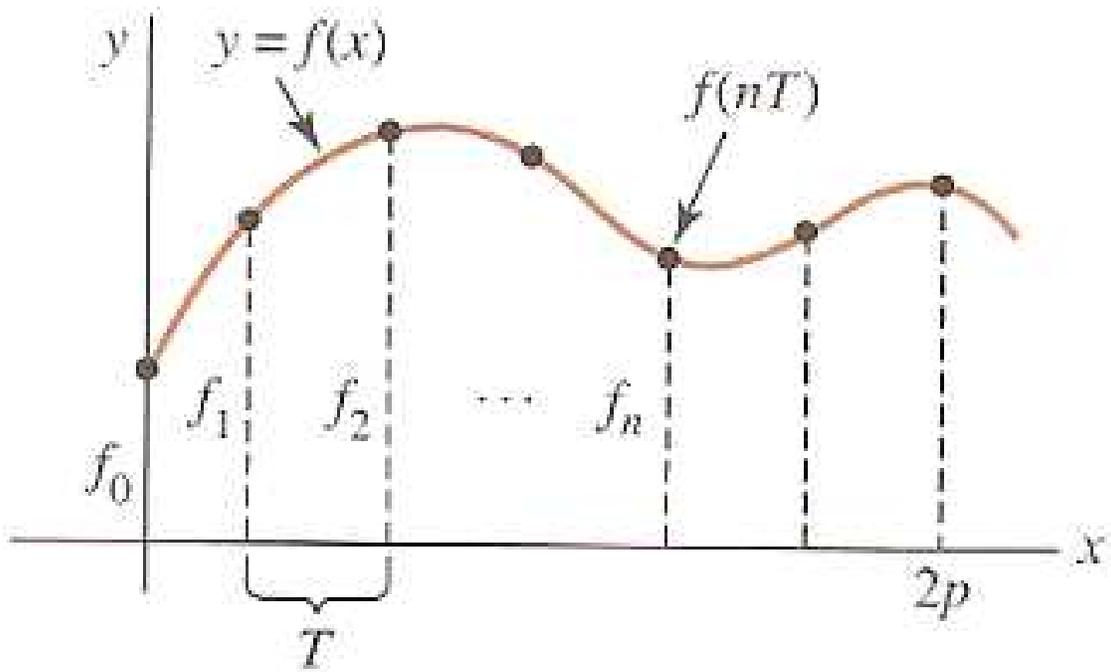


Figura 23: Função periódica, fonte: (ZILL; CULLEN, 2009).

Relembrando a notação exponencial de um número, (ABERDEEN, 2008).

$$e^{i\theta} = \cos \theta + i \operatorname{sen} \theta \quad (3.6)$$

e

$$e^{-i\theta} = \cos \theta - i \operatorname{sen} \theta \quad (3.7)$$

Então a transformada de uma função periódica $f(t)$ é representada por $F(\omega)$:

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) e^{-i\omega t} dt \quad (3.8)$$

O termo exponencial pode ser escrito em termos de senos e cossenos para obter:

(3.9)

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t)(\cos \omega t - i \operatorname{sen} \omega t) dt = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \cos \omega t dt - i \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \operatorname{sen} \omega t dt$$

A transformada é então a soma do termo real, primeira integral, e do termo imaginário, segunda integral. Se nós simplificarmos a equação substituindo por;

$$A(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \cos \omega t dt \quad (3.10)$$

e

$$B(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \operatorname{sen} \omega t dt \quad (3.11)$$

Então:

$$F(\omega) = A(\omega) - iB(\omega) \quad (3.12)$$

A magnitude (M) da função $F(\omega)$ é dada por:

$$M = |F(\omega)| = \sqrt{A^2(\omega) + B^2(\omega)} \quad (3.13)$$

E a fase $\phi(\omega)$ por:

$$\phi(\omega) = \tan^{-1}\left(\frac{B(\omega)}{A(\omega)}\right) \quad (3.14)$$

3.10 Construção do periodograma

Como a frequência e magnitude são funções do período, T , é possível a construção do periodograma da série temporal de dados históricos, que nada mais é do que um gráfico da magnitude, amplitude ou impacto da respectiva componente senoidal num determinado período. Daqui é possível determinar qual das componentes cíclicas tem impacto, magnitude, relevante sobre a série histórica de dados.

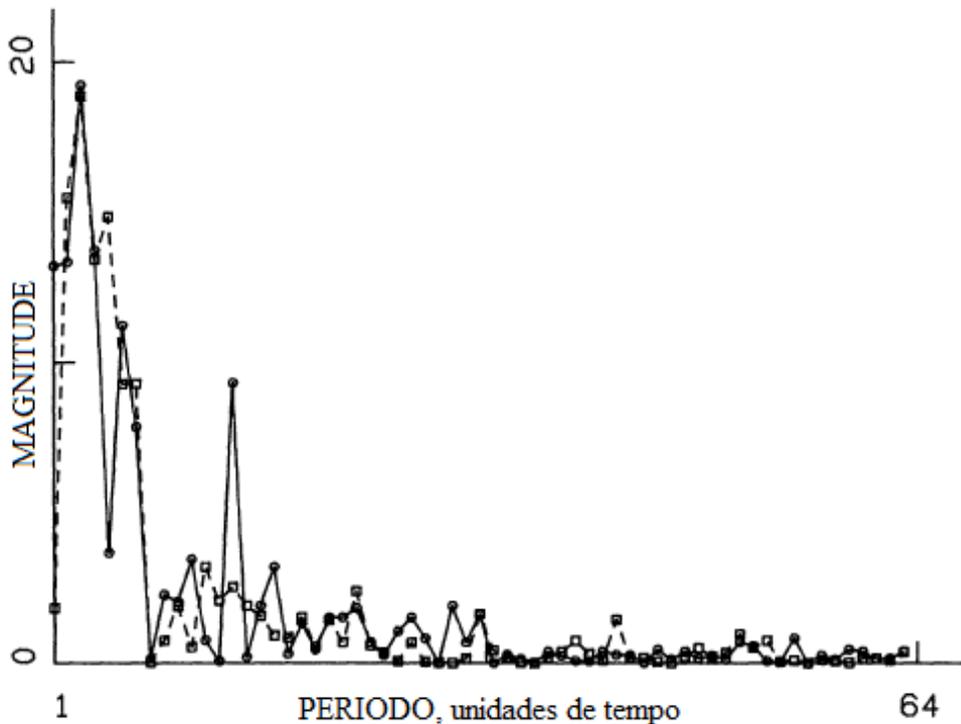


Figura 24: Exemplo de periodograma de uma função

3.11 Teorema de Nyquist - Aliasing ou espelhamento

Como descrito pelo teorema de Nyquist, a taxa de amostragem deve ser pelo menos duas vezes o valor da maior frequência que se deseja registrar.

Esse valor é conhecido como frequência de Nyquist, pois ao se tentar reproduzir uma frequência maior do que a frequência de Nyquist ocorre um fenômeno chamado *aliasing*, em que a frequência é "espelhada" ou "rebatida" para uma região mais grave do espectro, dessa forma devemos utilizar apenas a primeira metade do periodograma para uma análise de espectro livre do efeito de *aliasing*.

Na representação gráfica do *aliasing*, figura 25, a linha preta representa a taxa de amostragem e a linha cinza representa a frequência do sinal real.

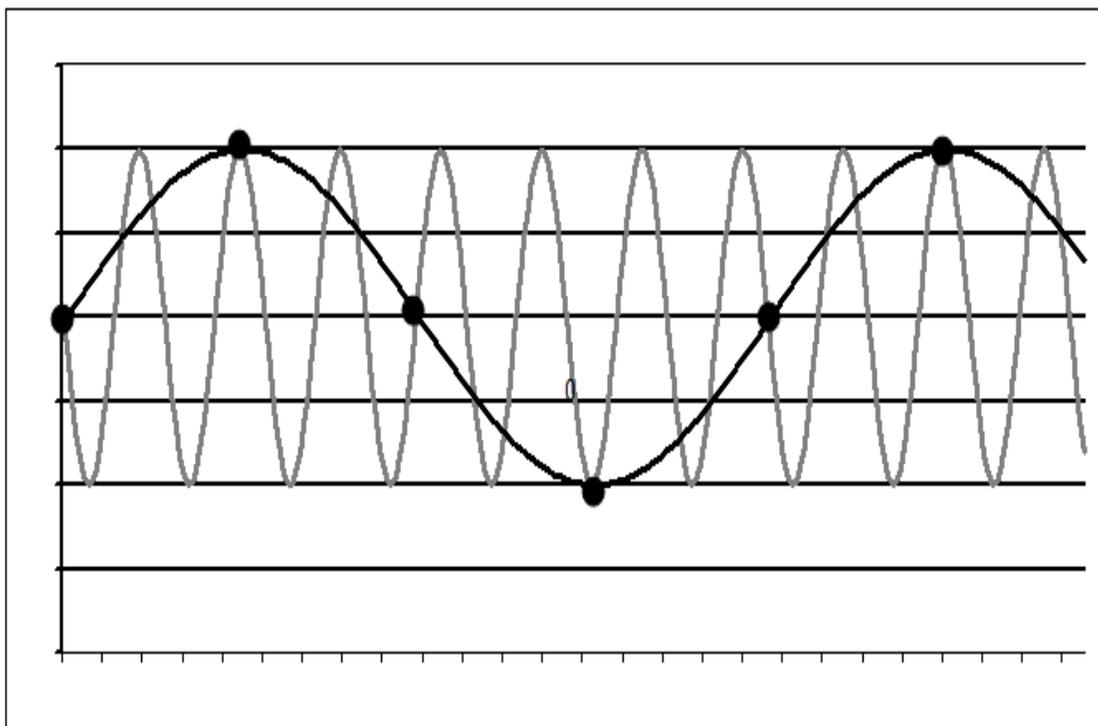


Figura 25: Representação gráfica do efeito aliasing

3.12 Construção do modelo matemático

De posse dos parâmetros de amplitude e período ou frequência obtida no periodograma pode-se ajustar a fase das componentes harmônicas obtidas pela transformada de Fourier. Com isso é possível retornar as séries de Fourier para construir o modelo matemático composto pela somatória das funções seno e cosseno que representam a série histórica de dados.

3.13 Processo da análise espectral

Podemos resumir que o processo de análise espectral concentra-se em aplicar a transformada de Fourier a uma série histórica de dados temporais e através dessa análise construir seu periodograma identificando as componentes de maior magnitude e sua frequência.

A partir da frequência e amplitude constroem-se, através das séries de Fourier, as componentes cíclicas individuais e pelo seu somatório tem-se o modelo da série original.

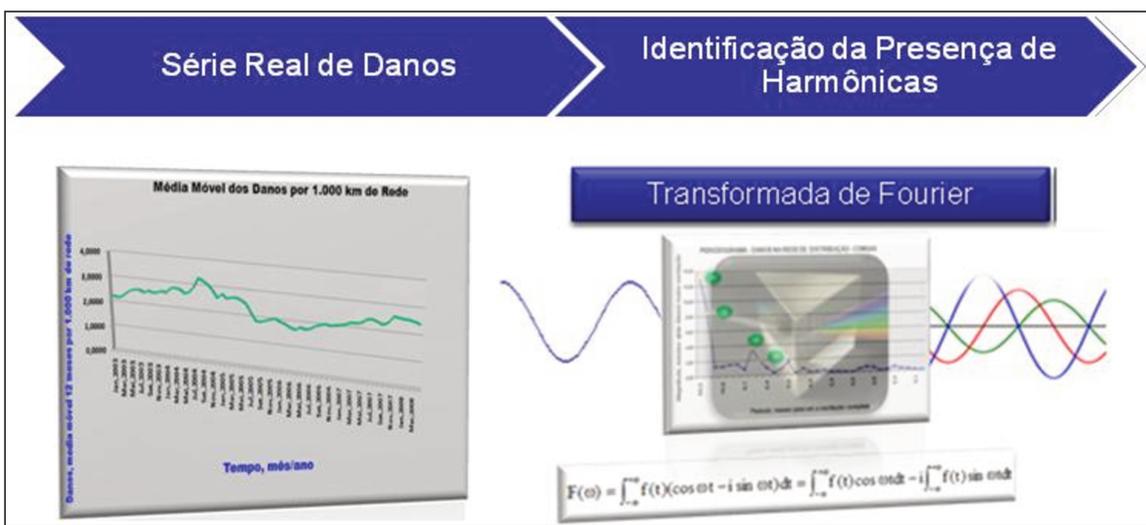


Figura 26: Uso da transformada de Fourier

Uma vez obtidos os coeficientes de Fourier pode-se fazer o caminho inverso pelo uso das séries de Fourier e reconstruir a serie inicial obtendo assim seu modelo matemático.

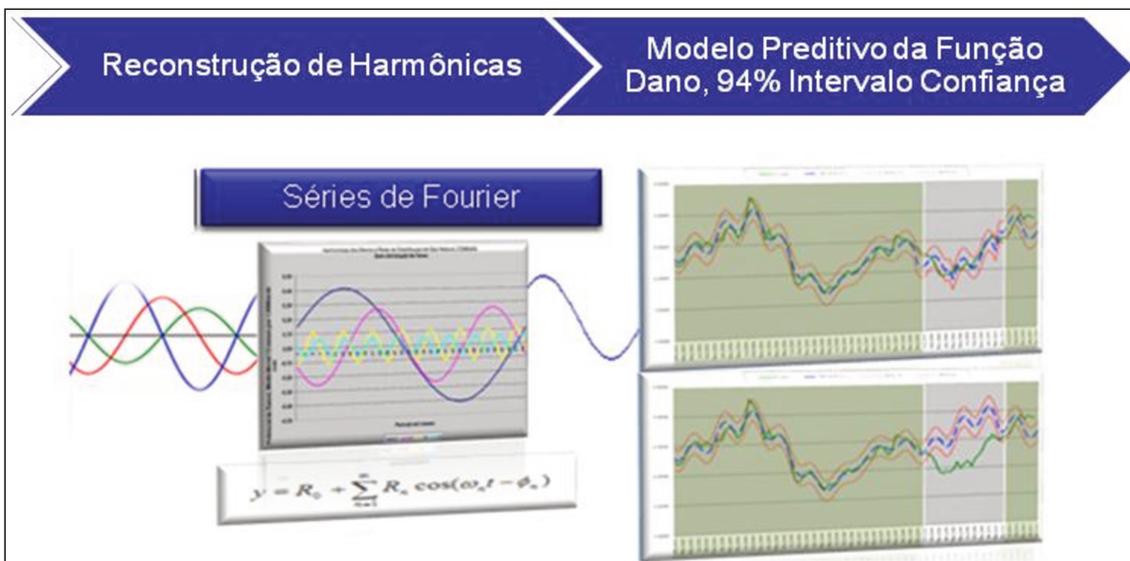


Figura 27: Uso das séries de Fourier

4 Materiais e métodos

O objeto desse estudo são as redes subterrâneas de distribuição de gás natural da empresa Comgás em sua área de concessão.

4.1 Área de concessão

Desde 1999, a Comgás é uma empresa privada, controlada pelo BG Group e Shell, que tem a concessão para a distribuição de gás natural em parte do estado de São Paulo. A partir dessa data se iniciou a modernização e expansão da rede de distribuição de gás natural e em 2012 a Cosan adquiriu da BG Group, 60,1 % do capital social da Comgás

Como a distribuição de gás canalizado é um serviço público, a sua operação por grupos privados está sujeita a normas e exigências estabelecidas no contrato de concessão, assinado com poder concedente (Estado de São Paulo). Para garantir que estas exigências sejam cumpridas, foi criada a - Agência Reguladora de Saneamento e Energia do Estado de São Paulo a – ARSESP, órgão que tem a finalidade de regular, controlar e fiscalizar as concessionárias de energia no estado de São Paulo.

A Comgás é hoje a maior distribuidora de gás natural canalizado do país. Conta com mais de cinco mil quilômetros de rede, levando gás natural para mais de 780 mil consumidores nos segmentos residencial, comercial e industrial, em 67 cidades. Sua área de concessão abriga cerca de um quarto do Produto Interno Bruto do país, abrangendo 177 municípios das regiões metropolitanas de São Paulo e Campinas, além da Baixada Santista e do Vale do Paraíba (COMGAS – concessão GN, 2009).



Figura 28: Área de concessão da Comgás

4.2 Sistema de produção, transmissão e distribuição

A figura 29 representa um fluxograma da cadeia produtiva do gás natural e seus principais sistemas e equipamentos até a chegada ao ponto final de consumo (FOSSA et al., 2010).

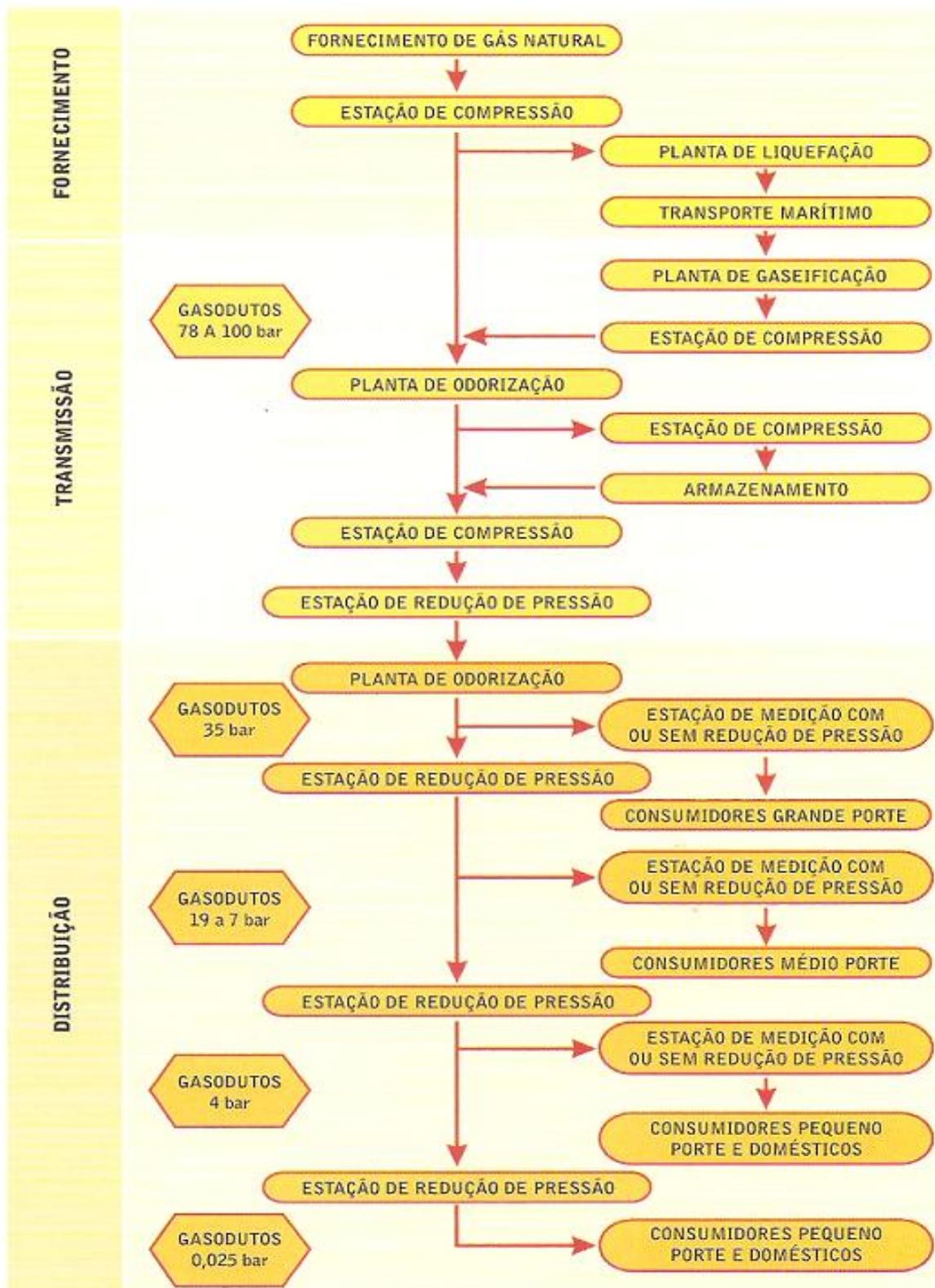


Figura 29: Fornecimento, transmissão e distribuição de GN.

4.3 Dados de danos à rede

A quantidade de danos mensais sobre a rede de distribuição de gás natural da concessionária Comgás por toda a sua área de concessão são os dados primários utilizados nesse estudo. Esses dados são coletados através de um sistema de inspeção periódica, uma central de *Call Center* e tabulados mensalmente em um banco de dados.

Esse estudo contempla dados de danos ocorridos no período de janeiro de 2002 a novembro de 2010 num total de 108 dados coletados a uma frequência mensal, a esses dados aplica-se a média móvel de doze meses, pois esta constata as mudanças de tendência e acompanha o seu desenvolvimento eliminando ou atenuando ruídos num período anual.

A série histórica a ser estudada, após a aplicação da media móvel, inicia em Janeiro de 2003 com média móvel de doze dados mensais de Fevereiro de 2002 a Janeiro de 2003, descartando-se Janeiro de 20002 e assim sucessivamente até Novembro de 2010, a cada novo tempo, consideramos um novo dado e abandonamos o mais antigo.

Portando agora dispomos de 95 dados de danos mensais representando o valor da média móvel dos doze últimos meses, incluindo ele próprio, no período de Janeiro de 2003 a Novembro de 2010.

Como a rede em questão encontra-se em plena expansão é de se esperar que o número absoluto de danos aumente conforme o comprimento da rede de distribuição de gás natural aumenta. Para corrigir essa possível distorção os dados foram então normalizados dividindo-se a média móvel de danos do mês em questão pelo respectivo comprimento em quilômetros da rede de distribuição nesse mesmo mês e o resultado é multiplicado por mil.

Dessa forma a unidade de medida dos dados passa a ser quantidade de danos por mil quilômetros de rede mês.

$$Dado = \left[\left[\frac{(Média\ móvel\ de\ danos\ em\ um\ determinado\ mês)}{(Comprimento\ da\ rede\ em\ quilômetros\ em\ um\ determinado\ mês)} \right] \times 1.000 \right]$$

Equação 1: Normalização dos danos por comprimento da rede.

Os 95 dados normalizados são apresentados sob a forma de uma série temporal nas duas tabelas 8 e 9, esses são então nossos dados secundários e foram a partir daqui utilizados nas transformadas de Fourier para a análise de espectro.

4.4 Análise espectral dos danos

O propósito da análise de espectro foi de decompor uma complexa série temporal de dados o obter suas componentes cíclicas de formato senoidal, senos e cossenos, com determinados comprimentos de onda. O resultado é a revelação de alguns ciclos recorrentes de diferentes tamanhos de onda que a compõem e que são mais do que simples ruídos.

4.5 Transformada de Fourier dos danos

A transformada rápida de Fourier sobre a serie temporal de dados de danos normalizados foi feita fazendo uso da função macro do pacote de análise de dados do Excel, *Análise de Fourier*.

Para a execução da função macro padrão do pacote estatístico do Excel, *Análise de Fourier*, observou-se que esta trabalha com quantidades de dados a uma potência de dois, 2, 4, 8, 16, 32, 64, 128, 256,..., e com número máximo de dados sendo 4.096.

Como foram coletados 95 dados normalizados de danos, a quantidade possível a ser compilada foi de 64, sendo os primeiros 64 dados escolhidos para a construção do modelo. Os 31 dados restantes foram utilizados para analisar a aderência do modelo aos dados futuros.

Dessa forma os primeiros 64 dados representam os danos mensais normalizados do período de janeiro de 2003 a abril de 2008, e os 31 dados restantes os danos mensais normalizados do período de maio de 2008 a novembro de 2010.

A aplicação da transformada de Fourier a série histórica dos danos nos retorna um conjunto de números complexos, conforme representado na equação (3.12) da transformada da função periódica $f(t)$ representada por $F(\omega)$

$$F(\omega) = A(\omega) - iB(\omega) \quad (3.12)$$

Vemos abaixo na figura 30 a aplicação da transformada de Fourier a série temporal de dados de danos contidos na coluna C e a sua respectiva transformada de Fourier através da representação complexa contida na coluna D.

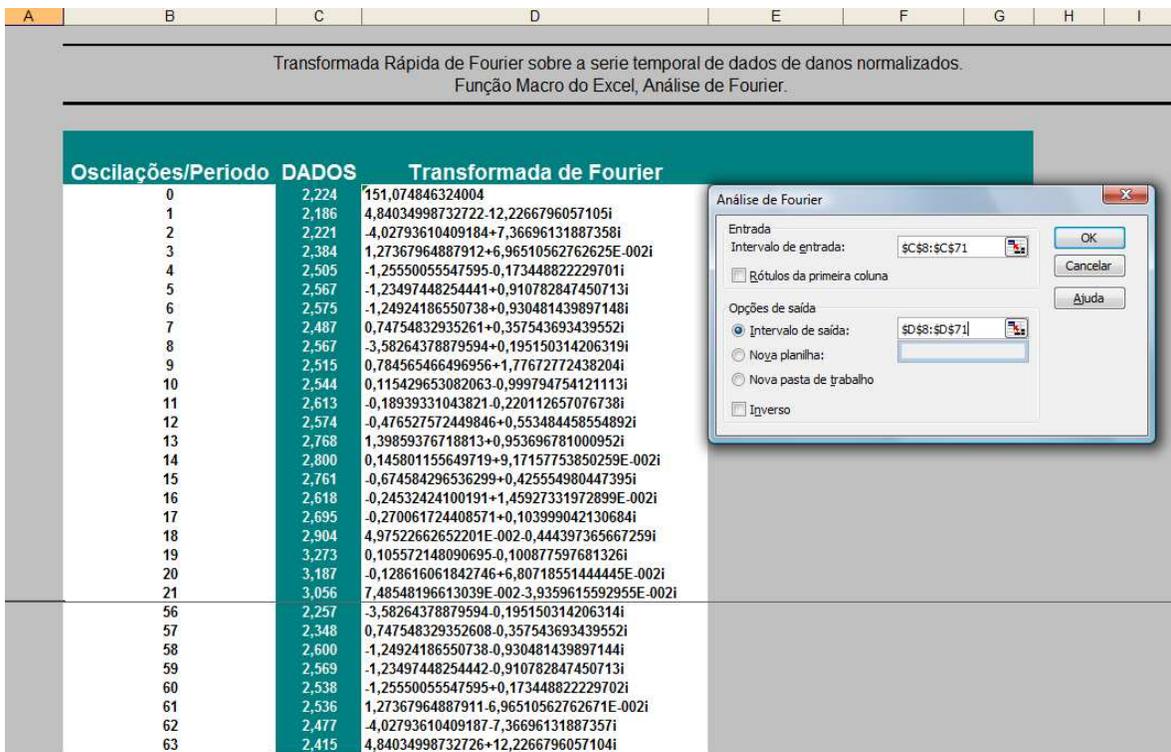


Figura 30: Excel utilizado para efetuar a transformada de Fourier.

4.6 Periodograma dos danos

Um periodograma é um tipo de gráfico que é também chamado de **espectro de potência** de uma série de dados, pois leva em conta a proporção da variação dos dados originais, referente às oscilações de cada frequência harmônica, sendo então um gráfico de magnitude, potencia, versus período de oscilação ou ciclo.

A magnitude (M) da função $F(\omega)$ é dada por;

$$M = |F(\omega)| = \sqrt{A^2(\omega) + B^2(\omega)} \quad (3.13)$$

O Excel através da função IMABS (), extrai diretamente o valor da magnitude aplicada ao numero complexo obtido pela transformada de Fourier.

| | A | B | C | D | E | F | G |
|----|---|--------------------|-------|---|---------|------------|---|
| 7 | | Oscilações/Periodo | DADOS | Transformada de Fourier | Período | Magnitude | |
| 8 | | 0 | 2,224 | 151,074846324004 | | | |
| 9 | | 1 | 2,186 | 4,84034998732722-12,2266796057105i | 64,0 | =IMABS(D9) | |
| 10 | | 2 | 2,221 | -4,02793610409184+7,36696131887358i | 32,0 | 8,40 | |
| 11 | | 3 | 2,384 | 1,27367964887912+6,96510562762625E-002i | 21,3 | 1,28 | |
| 12 | | 4 | 2,505 | -1,25550055547595-0,173448822229701i | 16,0 | 1,27 | |
| 13 | | 5 | 2,567 | -1,23497448254441+0,910782847450713i | 12,8 | 1,53 | |

Figura 31: Excel exemplo do cálculo de magnitude.

O período correspondente é obtido dividindo-se o período total de amostragem, 64, pelo número de oscilações por período de cada resultado da transformada de Fourier.

| | A | B | C | D | E | F | G |
|----|---|--------------------|-------|---|---------|-----------|-------|
| 7 | | Oscilações/Periodo | DADOS | Transformada de Fourier | Período | Magnitude | |
| 8 | | 0 | 2,224 | 151,074846324004 | | | |
| 9 | | 1 | 2,186 | 4,84034998732722-12,2266796057105i | | =64/B9 | 13,15 |
| 10 | | 2 | 2,221 | -4,02793610409184+7,36696131887358i | 32,0 | 8,40 | |
| 11 | | 3 | 2,384 | 1,27367964887912+6,96510562762625E-002i | 21,3 | 1,28 | |
| 12 | | 4 | 2,505 | -1,25550055547595-0,173448822229701i | 16,0 | 1,27 | |
| 13 | | 5 | 2,567 | -1,23497448254441+0,910782847450713i | 12,8 | 1,53 | |

Figura 32: Excel exemplo do cálculo do período.

4.7 Modelagem da função dano

Para a modelagem da função dano foi feita a soma algébrica das harmônicas representadas pelas séries de Fourier e com a diferença entre seu resultado e o valor real do dano no referido mês calculou-se o erro.

Para atingir um valor ótimo dos parâmetros, calculou-se a regressão linear sobre a diferença do erro ao quadrado e aplicou-se a função solver do Excel, sobre as respectivas magnitudes, atrasos e magnitude inicial de forma a se obter a menor somatória dos erros ao quadrado mantendo-se os períodos originais.

A partir da correlação entre o valor real e o modelo, obteve-se o coeficiente de determinação do modelo (R^2), que é da ordem de 94%.

Onde:

Q15 é Somatória do erro ao quadrado, SS.

Q12 é o valor médio da função, R_0 .

T12 é a Magnitude de H1, R1.

T13 é o Atraso de H1, $\Phi 1$.

T15 é a Magnitude de H2, R2.

T16 é o Atraso de H2, $\Phi 2$.

T18 é a Magnitude de H8, R8.

T19 é o Atraso de H8, $\Phi 8$.

T21 é a Magnitude de H9, R9.

T22 é o Atraso de H9, $\Phi 9$.

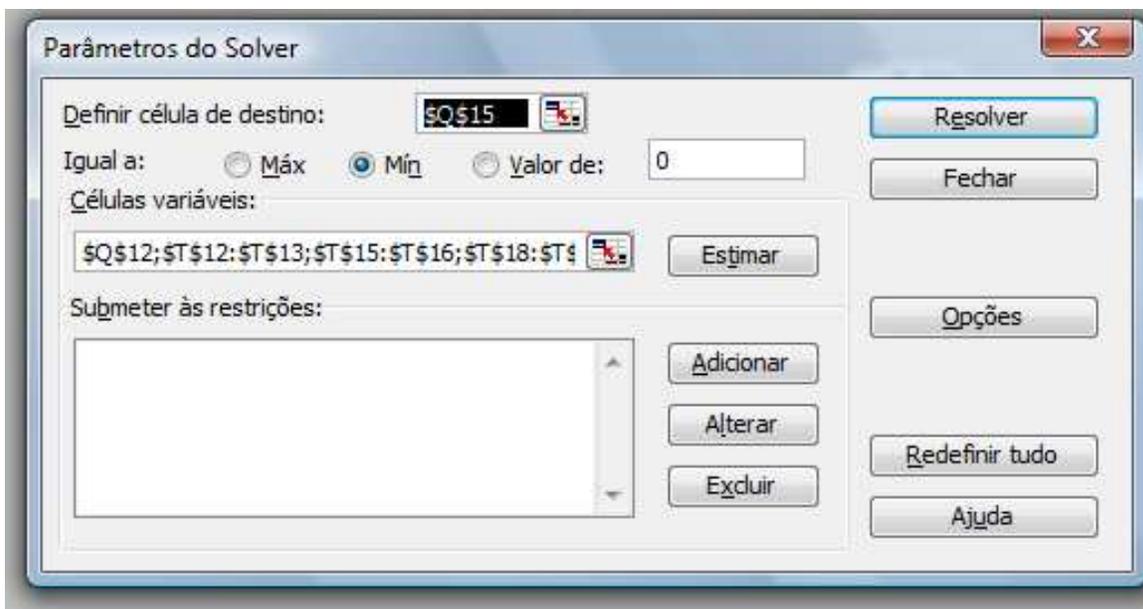


Figura 33: Aplicação de a função solver do Excel.

4.8 Aderência do modelo a valores futuros

Como descrito na seção 4.3, foram coletados 95 dados normalizados de danos, do período de janeiro de 2003 a novembro de 2010, sendo os primeiros 64 dados escolhidos para a construção do modelo.

Ou seja, o modelo foi construído com dados de janeiro de 2003 a abril de 2008, portanto os 31 dados restantes do período de maio de 2008 a novembro de 2010 foram utilizados para analisar a aderência ou validação do modelo aos dados futuros.

4.8.1 Modelagem de dados futuros

Como as harmônicas são funções do tempo, t , e os demais parâmetros da série já são conhecidos, basta apenas manipular a variável, t , para obter valores posteriores a abril de 2008 e assim observar a aderência do modelo a valores futuros. Ou seja, os dados posteriores de danos que vão de maio de 2008 a novembro de 2010 e posteriores, não utilizados na construção do modelo, puderam ser comparados aos valores propostos pelo modelo com suas diferenças observadas frente ao coeficiente de determinação, CD.

5 Resultados e discussões

As tabelas 8 e 9 apresentam a série temporal de dados de danos à rede de distribuição Comgás, média móvel dos últimos doze meses normalizados pelo comprimento da rede em quilômetros, no mês corrente e multiplicado por mil numa base mensal.

Tabela 8: Danos normalizados, Comgás 2003 – 2006

| | Dado | Mês, Ano | | Dado | Mês, Ano | | Dado | Mês, Ano | | Dado | Mês, Ano |
|----------------------------------|-------|----------|--|-------|----------|--|-------|----------|--|-------|----------|
| Danos mês /mil km de rede | 2,224 | Jan,2003 | | 2,574 | Jan,2004 | | 2,747 | Jan,2005 | | 1,922 | Jan,2006 |
| | 2,186 | Fev,2003 | | 2,768 | Fev,2004 | | 2,596 | Fev,2005 | | 1,860 | Fev,2006 |
| | 2,221 | Mar,2003 | | 2,800 | Mar,2004 | | 2,654 | Mar,2005 | | 1,746 | Mar,2006 |
| | 2,384 | Abr,2003 | | 2,761 | Abr,2004 | | 2,670 | Abr,2005 | | 1,688 | Abr,2006 |
| | 2,505 | Mai,2003 | | 2,618 | Mai,2004 | | 2,589 | Mai,2005 | | 1,793 | Mai,2006 |
| | 2,567 | Jun,2003 | | 2,695 | Jun,2004 | | 2,468 | Jun,2005 | | 1,746 | Jun,2006 |
| | 2,575 | Jul,2003 | | 2,904 | Jul,2004 | | 2,143 | Jul,2005 | | 1,776 | Jul,2006 |
| | 2,487 | Ago,2003 | | 3,273 | Ago,2004 | | 1,851 | Ago,2005 | | 1,910 | Ago,2006 |
| | 2,567 | Set,2003 | | 3,187 | Set,2004 | | 1,838 | Set,2005 | | 1,976 | Set,2006 |
| | 2,515 | Out,2003 | | 3,056 | Out,2004 | | 1,904 | Out,2005 | | 2,031 | Out,2006 |
| | 2,544 | Nov,2003 | | 2,859 | Nov,2004 | | 1,971 | Nov,2005 | | 1,991 | Nov,2006 |
| | 2,613 | Dez,2003 | | 2,581 | Dez,2004 | | 2,024 | Dez,2005 | | 2,030 | Dez,2006 |

Tabela 9: Danos normalizados, Comgás 2007 – 2010

| | Dado | Mês, Ano | | Dado | Mês, Ano | | Dado | Mês, Ano | | Dado | Mês, Ano |
|-----------------------------------|-------|----------|--|-------|----------|--|-------|----------|--|-------|-----------|
| Danos mês / mil km de rede | 2,057 | Jan,2007 | | 2,538 | Jan,2008 | | 1,934 | Jan,2009 | | 2,481 | Jan,2010 |
| | 2,114 | Fev,2007 | | 2,536 | Fev,2008 | | 1,922 | Fev,2009 | | 2,569 | Fev,2010 |
| | 2,204 | Mar,2007 | | 2,477 | Mar,2008 | | 1,968 | Mar,2009 | | 2,511 | Mar,2010 |
| | 2,190 | Abr,2007 | | 2,415 | Abr,2008 | | 2,097 | Abr,2009 | | 2,454 | Abr,2010 |
| | 2,242 | Mai,2007 | | 2,402 | Mai,2008 | | 1,981 | Mai,2009 | | 2,535 | Mai,2010 |
| | 2,384 | Jun,2007 | | 2,288 | Jun,2008 | | 2,062 | Jun,2009 | | 2,530 | Jun,2010 |
| | 2,414 | Jul,2007 | | 2,262 | Jul,2008 | | 2,115 | Jul,2009 | | 2,591 | Jul,2010 |
| | 2,343 | Ago,2007 | | 2,249 | Ago,2008 | | 2,015 | Ago,2009 | | 2,737 | Ago,2010 |
| | 2,257 | Set,2007 | | 2,208 | Set,2008 | | 2,146 | Set,2009 | | 2,832 | Set,2010 |
| | 2,348 | Out,2007 | | 2,088 | Out,2008 | | 2,209 | Out,2009 | | 2,919 | Out,2010 |
| | 2,600 | Nov,2007 | | 1,939 | Nov,2008 | | 2,292 | Nov,2009 | | 2,829 | Nov,2010 |
| | 2,569 | Dez,2007 | | 1,899 | Dez,2008 | | 2,437 | Dez,2009 | | | Dez, 2010 |

A análise de espectro iniciou com a aplicação da Transformada de Fourier a série temporal de dados de danos descrita nas tabelas 8 e 9.

A exceção do primeiro valor da tabela 10 que representa a soma de todos os inteiros da série, os demais valores representam o resultado da transformada para um determinado número de oscilações por período, que nesse estudo vai de 1 a 64 meses.

O resultado da Transformada de Fourier é apresentado a seguir nas tabelas 10 e 11, em ordem crescente da quantidade de oscilações por período de amostragem, 64 meses, e sua respectiva representação complexa.

A tabela 10 contém resultados de 1 a 32 oscilações por período, sendo o período total de amostragem de 64 meses.

A tabela 11 contém resultados de 33 a 63 oscilações por período, sendo o período total de amostragem de 64 meses.

A tabela 12 contém o período e magnitude da função dano e foi dividida em duas colunas conforme período de amostragem para se evitar o efeito *aliasing*.

Tabela 10: Transformada de Fourier, danos Comgás, Ciclos 1-32.

| | Transformada rápida de Fourier | Oscilações / Período |
|---|--|----------------------|
| Representação Complexa $F(w) = A(w) - iB(w)$, Equação (5) | 151,074846324004 | Soma dos Inteiros |
| | 4,84034998732722-12,2266796057105i | 1 |
| | -4,02793610409184+7,36696131887358i | 2 |
| | 1,27367964887912+6,96510562762625E-002i | 3 |
| | -1,25550055547595-0,173448822229701i | 4 |
| | -1,23497448254441+0,910782847450713i | 5 |
| | -1,24924186550738+0,930481439897148i | 6 |
| | 0,74754832935261+0,357543693439552i | 7 |
| | -3,58264378879594+0,195150314206319i | 8 |
| | 0,784565466496956+1,77672772438204i | 9 |
| | 0,115429653082063-0,999794754121113i | 10 |
| | -0,18939331043821-0,220112657076738i | 11 |
| | -0,476527572449846+0,553484458554892i | 12 |
| | 1,39859376718813+0,953696781000952i | 13 |
| | 0,145801155649719+9,17157753850259E-002i | 14 |
| | -0,674584296536299+0,425554980447395i | 15 |
| | -0,24532424100191+1,45927331972899E-002i | 16 |
| | -0,270061724408571+0,103999042130684i | 17 |
| | 4,97522662652201E-002-0,444397365667259i | 18 |
| | 0,105572148090695-0,100877597681326i | 19 |
| | -0,128616061842746+6,80718551444445E-002i | 20 |
| | 7,48548196613039E-002-3,9359615592955E-002i | 21 |
| | 5,51953118971817E-002+1,22488089270451E-002i | 22 |
| | -1,87319791489652E-002+0,477781333891233i | 23 |
| | 0,718527010153741-6,73585427161238E-002i | 24 |
| | -0,599280018750954-8,85143828962991E-002i | 25 |
| | -0,167874505615342+4,83036225010651E-002i | 26 |
| | -5,93918781088654E-003-0,261483441086944i | 27 |
| | -0,644445640755239+5,75976204861328E-002i | 28 |
| | 6,15324991595407E-002+0,328268983783877i | 29 |
| | 0,17959752937427-0,208273819477537i | 30 |
| | -0,114062290586665-5,63945507166475E-002i | 31 |
| -5,0552811742449E-002 | 32 | |

Tabela 11: Transformada, de Fourier, danos Comgás, Ciclos 33-63

| | Transformada rápida de Fourier | Oscilações / Período |
|--|--|----------------------|
| Representação Complexa $F(w) = A(w) - iB(w)$, Equação (5) | -0,114062290586654+5,63945507166492E-002i | 33 |
| | 0,179597529374264+0,208273819477534i | 34 |
| | 6,15324991595397E-002-0,328268983783875i | 35 |
| | -0,64444564075524-5,75976204861329E-002i | 36 |
| | -5,93918781088587E-003+0,261483441086945i | 37 |
| | -0,167874505615342-4,83036225010669E-002i | 38 |
| | -0,599280018750956+8,85143828963035E-002i | 39 |
| | 0,718527010153741+6,7358542716118E-002i | 40 |
| | -1,87319791489688E-002-0,477781333891229i | 41 |
| | 5,51953118971831E-002-1,22488089270472E-002i | 42 |
| | 7,48548196613032E-002+3,93596155929552E-002i | 43 |
| | -0,128616061842747-6,80718551444455E-002i | 44 |
| | 0,105572148090694+0,100877597681329i | 45 |
| | 4,97522662652248E-002+0,444397365667258i | 46 |
| | -0,270061724408578-0,103999042130683i | 47 |
| | -0,24532424100191-1,45927331972899E-002i | 48 |
| | -0,674584296536301-0,425554980447388i | 49 |
| | 0,145801155649721-9,17157753850295E-002i | 50 |
| | 1,39859376718813-0,953696781000957i | 51 |
| | -0,476527572449847-0,553484458554892i | 52 |
| | -0,189393310438211+0,220112657076741i | 53 |
| | 0,11542965308207+0,999794754121115i | 54 |
| | 0,784565466496945-1,77672772438204i | 55 |
| | -3,58264378879594-0,195150314206314i | 56 |
| | 0,747548329352608-0,357543693439552i | 57 |
| | -1,24924186550738-0,930481439897144i | 58 |
| | -1,23497448254442-0,910782847450713i | 59 |
| | -1,25550055547595+0,173448822229702i | 60 |
| | 1,27367964887911-6,96510562762671E-002i | 61 |
| | -4,02793610409187-7,36696131887357i | 62 |
| | 4,84034998732726+12,2266796057104i | 63 |

Tabela 12: Periodograma dos danos a rede Comgás.

| Teorema de Nyquist Período Oscilação ≥ 2 vezes Taxa de Amostragem, 1 mês | | | Teorema de Nyquist Período Oscilação < 2 vezes taxa de Amostragem, 1 mês <i>Aliasing</i> | | |
|--|------------------|---|---|------------------|---|
| Harmônica | PERÍODO meses | MAGNITUDE qtde Danos Normalizados | Harmônica | PERÍODO meses | MAGNITUDE qtde Danos Normalizados |
| H1 | 64,000 | 13,15 | H33 | 1,939 | 0,13 |
| H2 | 32,000 | 8,40 | H34 | 1,882 | 0,28 |
| H3 | 21,333 | 1,28 | H35 | 1,829 | 0,33 |
| H4 | 16,000 | 1,27 | H36 | 1,778 | 0,65 |
| H5 | 12,800 | 1,53 | H37 | 1,730 | 0,26 |
| H6 | 10,667 | 1,56 | H38 | 1,684 | 0,17 |
| H7 | 9,143 | 0,83 | H39 | 1,641 | 0,61 |
| H8 | 8,000 | 3,59 | H40 | 1,600 | 0,72 |
| H9 | 7,111 | 1,94 | H41 | 1,561 | 0,48 |
| H10 | 6,400 | 1,01 | H42 | 1,524 | 0,06 |
| H11 | 5,818 | 0,29 | H43 | 1,488 | 0,08 |
| H12 | 5,333 | 0,73 | H44 | 1,455 | 0,15 |
| H13 | 4,923 | 1,69 | H45 | 1,422 | 0,15 |
| H14 | 4,571 | 0,17 | H46 | 1,391 | 0,45 |
| H15 | 4,267 | 0,80 | H47 | 1,362 | 0,29 |
| H16 | 4,000 | 0,25 | H48 | 1,333 | 0,25 |
| H17 | 3,765 | 0,29 | H49 | 1,306 | 0,80 |
| H18 | 3,556 | 0,45 | H50 | 1,280 | 0,17 |
| H19 | 3,368 | 0,15 | H51 | 1,255 | 1,69 |
| H20 | 3,200 | 0,15 | H52 | 1,231 | 0,73 |
| H21 | 3,048 | 0,08 | H53 | 1,208 | 0,29 |
| H22 | 2,909 | 0,06 | H54 | 1,185 | 1,01 |
| H23 | 2,783 | 0,48 | H55 | 1,164 | 1,94 |
| H24 | 2,667 | 0,72 | H56 | 1,143 | 3,59 |
| H25 | 2,560 | 0,61 | H57 | 1,123 | 0,83 |
| H26 | 2,462 | 0,17 | H58 | 1,103 | 1,56 |
| H27 | 2,370 | 0,26 | H59 | 1,085 | 1,53 |
| H28 | 2,286 | 0,65 | H60 | 1,067 | 1,27 |
| H29 | 2,207 | 0,33 | H61 | 1,049 | 1,28 |
| H30 | 2,133 | 0,28 | H62 | 1,032 | 8,40 |
| H31 | 2,065 | 0,13 | H63 | 1,016 | 13,15 |
| H32 | 2,000 | 0,05 | | | |

Como o período de amostragem dos danos a rede de distribuição de gás natural tem uma taxa mensal, as harmônicas válidas para o estudo devem ter um período de oscilação de pelo menos duas vezes a taxa de amostragem que é de um mês.

Ou seja, as harmônicas H1 a H32 atendem a esse critério, período maior ou igual a dois meses.



Figura 34: Periodograma dos danos a rede Comgás.

Ordenando as harmônicas H1 a H 32 da tabela 12 em ordem decrescente e calculando a somatória das magnitudes individuais, verificou-se que há quatro frequências harmônicas, H1, H2, H8 e H9 que são as responsáveis por 60% da magnitude total do espectro, tabela 13.

Tabela 13: Harmônicas de maior magnitude de danos à rede Comgás

| Harmônica | PERÍODO meses | <i>Ordem Decrescente</i> MAGNITUDE | Somatória das Magnitudes | Somatória (%) das Magnitudes | Magnitude Individual % |
|-----------|------------------|---|--------------------------------|---------------------------------|------------------------------|
| H1 | 64 | 13 | 13 | 30,4% | 30,4% |
| H2 | 32 | 8 | 22 | 49,7% | 19,4% |
| H8 | 8 | 4 | 25 | 58,0% | 8,3% |
| H9 | 7 | 2 | 27 | 62,5% | 4,5% |
| H13 | 5 | 2 | 29 | 66,4% | 3,9% |
| H6 | 11 | 2 | 30 | 70,0% | 3,6% |
| H5 | 13 | 2 | 32 | 73,5% | 3,5% |
| H3 | 21 | 1 | 33 | 76,5% | 2,9% |
| H4 | 16 | 1 | 34 | 79,4% | 2,9% |
| H10 | 6 | 1 | 35 | 81,7% | 2,3% |
| H7 | 9 | 1 | 36 | 83,7% | 1,9% |
| H15 | 4 | 1 | 37 | 85,5% | 1,8% |
| H12 | 5 | 1 | 38 | 87,2% | 1,7% |
| H24 | 3 | 1 | 38 | 88,8% | 1,7% |
| H28 | 2 | 1 | 39 | 90,3% | 1,5% |
| H25 | 3 | 1 | 40 | 91,7% | 1,4% |
| H23 | 3 | 0 | 40 | 92,8% | 1,1% |
| H18 | 4 | 0 | 41 | 93,9% | 1,0% |
| H29 | 2 | 0 | 41 | 94,6% | 0,8% |
| H11 | 6 | 0 | 41 | 95,3% | 0,7% |
| H17 | 4 | 0 | 42 | 96,0% | 0,7% |
| H30 | 2 | 0 | 42 | 96,6% | 0,6% |
| H27 | 2 | 0 | 42 | 97,2% | 0,6% |
| H16 | 4 | 0 | 42 | 97,8% | 0,6% |
| H26 | 2 | 0 | 43 | 98,2% | 0,4% |
| H14 | 5 | 0 | 43 | 98,6% | 0,4% |
| H19 | 3 | 0 | 43 | 98,9% | 0,3% |
| H20 | 3 | 0 | 43 | 99,3% | 0,3% |
| H31 | 2 | 0 | 43 | 99,6% | 0,3% |
| H21 | 3 | 0 | 43 | 99,8% | 0,2% |
| H22 | 3 | 0 | 43 | 99,9% | 0,1% |
| H32 | 2 | 0 | 43 | 100,0% | 0,1% |

Na figura 35 é apresentado o periodograma válido dos danos à rede de distribuição da Comgás com a identificação das harmônicas de maior amplitude ou potência identificadas na tabela 13.

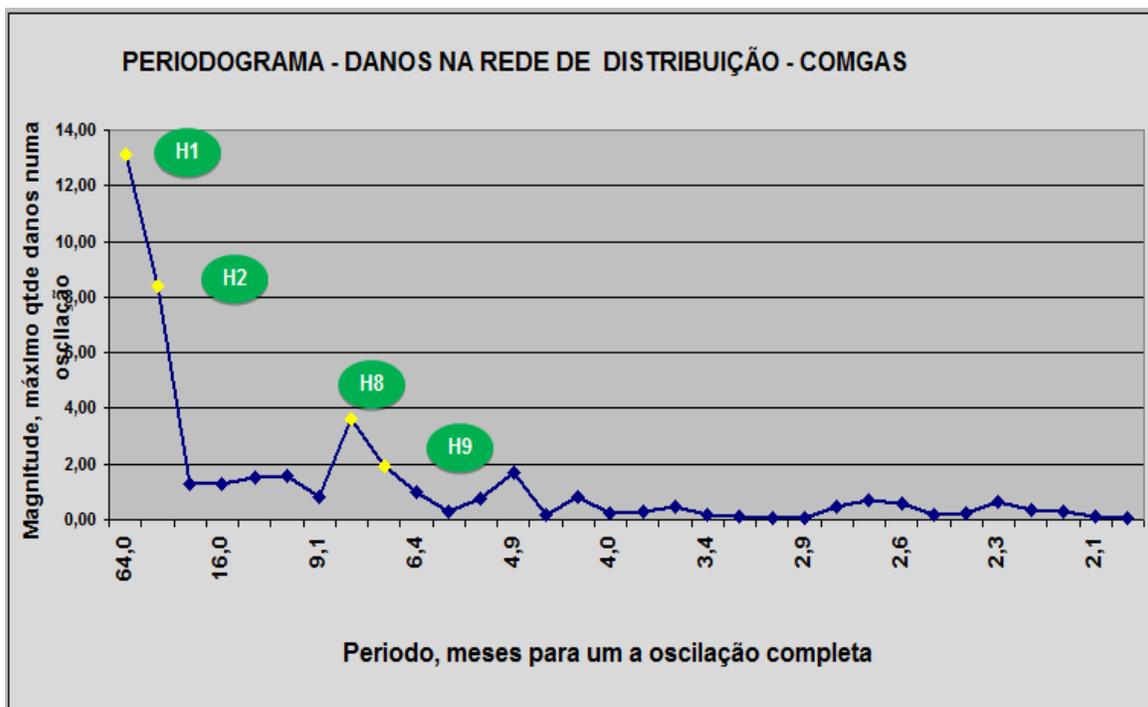


Figura 35: Periodograma válido dos danos à rede.

5.1 Séries de Fourier dos danos

De posse da magnitude e período das harmônicas H1, H2, H8 e H9 contidas na tabela 14, foram construídas suas representações no domínio do tempo conforme a série de Fourier, representada na equação abaixo onde a frequência pode ser expressa como $\omega = 2\pi/T$ e R_0 é um offset, o valor médio da função dano.

$$y = R_0 + \sum_{n=1}^{\infty} R_n \cos(2\pi(t_n - \phi_n) \setminus T_n) \quad (3.4b)$$

Tabela14: Harmônicas de maior amplitude, danos a rede.

| Parâmetros de Fourier | | | | |
|--------------------------|-------------|-----------|---------------------|-----------|
| R0 | 0 | R1 | Magnitude H1 | 13 |
| | | Φ1 | Atraso H1 | 0 |
| R² (%) | ---- | T1 | Período H1 | 64 |
| SS | ---- | R2 | Magnitude H2 | 8 |
| | | Φ2 | Atraso H2 | 0 |
| | | T2 | Período H2 | 32 |
| | | R8 | Magnitude H8 | 4 |
| | | Φ8 | Atraso H8 | 0 |
| | | T8 | Período H8 | 8 |
| | | R9 | Magnitude H9 | 2 |
| | | Φ9 | Atraso H9 | 0 |
| | | T9 | Período H9 | 7 |

A tabela 15 contém a série de Fourier das harmônicas 1, 2, 8 e 9 para o período de janeiro de 2003 a agosto de 2005.

A tabela 16 contém a série de Fourier das harmônicas 1, 2, 8 e 9 para o período de setembro de 2003 a abril de 2008.

Tabela 15: Séries de Fourier, harmônicas dos danos a rede, ciclos 1-32.

| Período meses | H1 | H2 | H8 | H9 |
|--------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 1 | 0,15 | -0,13 | -0,12 | 0,05 |
| 2 | 0,19 | -0,17 | -0,08 | -0,01 |
| 3 | 0,22 | -0,21 | 0,00 | -0,05 |
| 4 | 0,25 | -0,23 | 0,08 | -0,06 |
| 5 | 0,28 | -0,25 | 0,12 | -0,02 |
| 6 | 0,31 | -0,26 | 0,08 | 0,03 |
| 7 | 0,34 | -0,26 | 0,00 | 0,06 |
| 8 | 0,36 | -0,25 | -0,08 | 0,05 |
| 9 | 0,38 | -0,23 | -0,12 | -0,01 |
| 10 | 0,39 | -0,20 | -0,08 | -0,05 |
| 11 | 0,40 | -0,16 | 0,00 | -0,06 |
| 12 | 0,41 | -0,12 | 0,08 | -0,02 |
| 13 | 0,41 | -0,07 | 0,12 | 0,03 |
| 14 | 0,41 | -0,02 | 0,08 | 0,06 |
| 15 | 0,40 | 0,03 | 0,00 | 0,05 |
| 16 | 0,40 | 0,08 | -0,08 | -0,01 |
| 17 | 0,38 | 0,13 | -0,12 | -0,05 |
| 18 | 0,37 | 0,17 | -0,08 | -0,06 |
| 19 | 0,35 | 0,21 | 0,00 | -0,02 |
| 20 | 0,32 | 0,23 | 0,08 | 0,03 |
| 21 | 0,30 | 0,25 | 0,12 | 0,06 |
| 22 | 0,27 | 0,26 | 0,08 | 0,05 |
| 23 | 0,23 | 0,26 | 0,00 | -0,01 |
| 24 | 0,20 | 0,25 | -0,08 | -0,05 |
| 25 | 0,16 | 0,23 | -0,12 | -0,06 |
| 26 | 0,13 | 0,20 | -0,08 | -0,02 |
| 27 | 0,09 | 0,16 | 0,00 | 0,03 |
| 28 | 0,05 | 0,12 | 0,08 | 0,06 |
| 29 | 0,01 | 0,07 | 0,12 | 0,05 |
| 30 | -0,03 | 0,02 | 0,08 | -0,01 |
| 31 | -0,07 | -0,03 | 0,00 | -0,05 |
| 32 | -0,11 | -0,08 | -0,08 | -0,06 |

Tabela 16: Séries de Fourier, harmônicas dos danos a rede, ciclos 33-64.

| Período meses | H1 | H2 | H8 | H9 |
|--------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 33 | -0,15 | -0,13 | -0,12 | -0,02 |
| 34 | -0,19 | -0,17 | -0,08 | 0,03 |
| 35 | -0,22 | -0,21 | 0,00 | 0,06 |
| 36 | -0,25 | -0,23 | 0,08 | 0,05 |
| 37 | -0,28 | -0,25 | 0,12 | -0,01 |
| 38 | -0,31 | -0,26 | 0,08 | -0,05 |
| 39 | -0,34 | -0,26 | 0,00 | -0,06 |
| 40 | -0,36 | -0,25 | -0,08 | -0,02 |
| 41 | -0,38 | -0,23 | -0,12 | 0,03 |
| 42 | -0,39 | -0,20 | -0,08 | 0,06 |
| 43 | -0,40 | -0,16 | 0,00 | 0,05 |
| 44 | -0,41 | -0,12 | 0,08 | -0,01 |
| 45 | -0,41 | -0,07 | 0,12 | -0,05 |
| 46 | -0,41 | -0,02 | 0,08 | -0,06 |
| 47 | -0,40 | 0,03 | 0,00 | -0,02 |
| 48 | -0,40 | 0,08 | -0,08 | 0,03 |
| 49 | -0,38 | 0,13 | -0,12 | 0,06 |
| 50 | -0,37 | 0,17 | -0,08 | 0,05 |
| 51 | -0,35 | 0,21 | 0,00 | -0,01 |
| 52 | -0,32 | 0,23 | 0,08 | -0,05 |
| 53 | -0,30 | 0,25 | 0,12 | -0,06 |
| 54 | -0,27 | 0,26 | 0,08 | -0,02 |
| 55 | -0,23 | 0,26 | 0,00 | 0,03 |
| 56 | -0,20 | 0,25 | -0,08 | 0,06 |
| 57 | -0,16 | 0,23 | -0,12 | 0,05 |
| 58 | -0,13 | 0,20 | -0,08 | -0,01 |
| 59 | -0,09 | 0,16 | 0,00 | -0,05 |
| 60 | -0,05 | 0,12 | 0,08 | -0,06 |
| 61 | -0,01 | 0,07 | 0,12 | -0,02 |
| 62 | 0,03 | 0,02 | 0,08 | 0,03 |
| 63 | 0,07 | -0,03 | 0,00 | 0,06 |
| 64 | 0,11 | -0,08 | -0,08 | 0,05 |

A figura 36 é a representação gráfica de cada harmônica obtida com os valores das tabelas 15 e 16, onde o eixo (x) representa o período do tempo em meses e o eixo (y) a magnitude ou potencialidade de geração ou atenuação de danos a rede de distribuição de gás natural, média móvel de doze meses por mil quilômetros de rede.

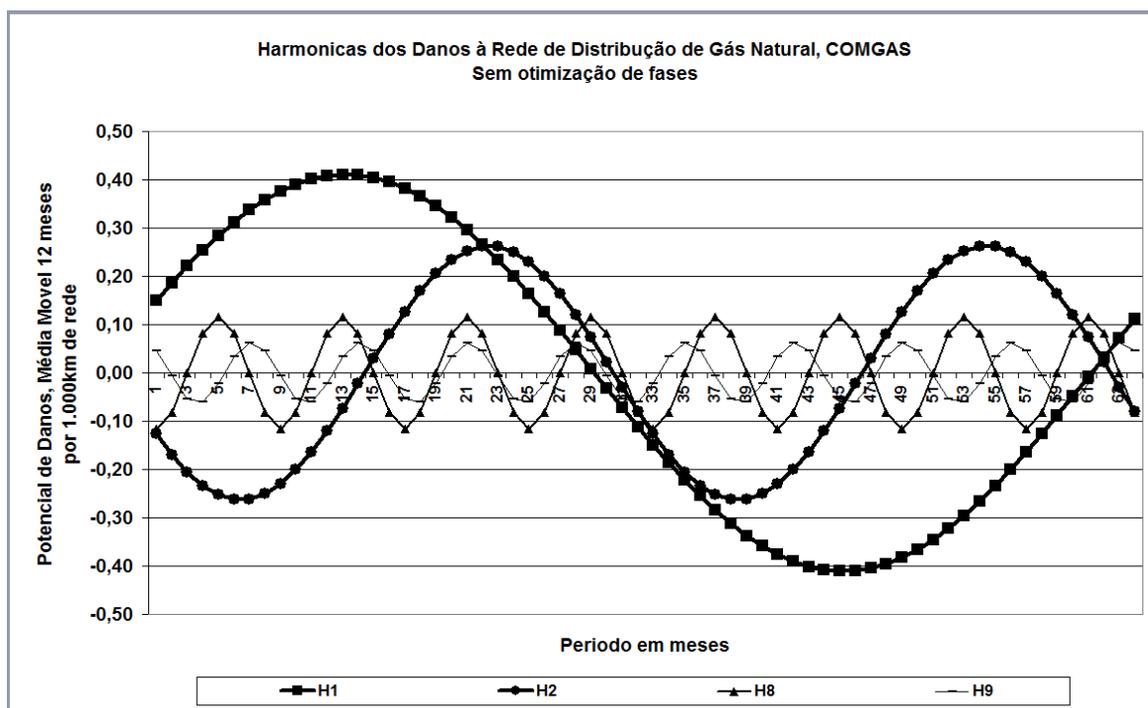


Figura 36: Representação gráfica, harmônicas dos danos.

O processo de melhoria dos parâmetros pela aplicação da função solver sobre a magnitude e atraso identificou um coeficiente de determinação R^2 de 94% e um valor médio de danos, R_0 igual a 2,36 danos mês por 1.000 quilômetros de rede e as seguintes magnitudes, atrasos de fase e período para as harmônicas H1, H2, H8 e H9, conforme tabela 17

A seguir são apresentadas as tabelas 18 e 19 com os cálculos da modelagem de forma a se obter o menor erro possível entre modelo e dado real e se atingir um intervalo de confiança, IC, da ordem de 95%.

Tabela 17: Melhoria dos parâmetros, harmônicas dos danos a rede.

| Parâmetros de Fourier | | | | |
|------------------------------|-----------------|-----------|---------------------|--------------|
| Ro | 2,36 | R1 | Magnitude H1 | 0,41 |
| R² (%) | 94,26241 | Φ1 | Atraso H1 | 13,20 |
| | | T1 | Período H1 | 64 |
| | | R2 | Magnitude H2 | -0,26 |
| SS | 0,49516 | Φ2 | Atraso H2 | 6,43 |
| | | T2 | Período H2 | 32 |
| | | R8 | Magnitude H8 | 0,12 |
| | | Φ8 | Atraso H8 | 4,99 |
| | | T8 | Período H8 | 8 |
| | | R9 | Magnitude H9 | 0,06 |
| | | Φ9 | Atraso H9 | 0,13 |
| | | T9 | Período H9 | 7 |

Tabela 18: Modelagem dos danos a rede, Jan 2003 – Ago 2005

| Período meses | Dado | H1 | H2 | H8 | H9 | Modelo | DIF ² | Data | (+) IC | (-) IC |
|---------------|--------|-------|-------|-------|-------|---------|------------------|----------|---------|---------|
| 1 | 2,2243 | 0,15 | -0,13 | -0,12 | 0,05 | 2,31155 | 0,00761 | Jan,2003 | 2,48395 | 2,13915 |
| 2 | 2,1864 | 0,19 | -0,17 | -0,08 | -0,01 | 2,28870 | 0,01046 | Fev,2003 | 2,46110 | 2,11630 |
| 3 | 2,2213 | 0,22 | -0,21 | 0,00 | -0,05 | 2,32348 | 0,01045 | Mar,2003 | 2,49588 | 2,15108 |
| 4 | 2,3839 | 0,25 | -0,23 | 0,08 | -0,06 | 2,40380 | 0,00040 | Abr,2003 | 2,57620 | 2,23139 |
| 5 | 2,5048 | 0,28 | -0,25 | 0,12 | -0,02 | 2,48725 | 0,00031 | Mai,2003 | 2,65965 | 2,31485 |
| 6 | 2,5671 | 0,31 | -0,26 | 0,08 | 0,03 | 2,52557 | 0,00172 | Jun,2003 | 2,69797 | 2,35317 |
| 7 | 2,5746 | 0,34 | -0,26 | 0,00 | 0,06 | 2,49798 | 0,00587 | Jul,2003 | 2,67038 | 2,32558 |
| 8 | 2,4869 | 0,36 | -0,25 | -0,08 | 0,05 | 2,43025 | 0,00321 | Ago,2003 | 2,60265 | 2,25785 |
| 9 | 2,5672 | 0,38 | -0,23 | -0,12 | -0,01 | 2,38319 | 0,03385 | Set,2003 | 2,55559 | 2,21079 |
| 10 | 2,5148 | 0,39 | -0,20 | -0,08 | -0,05 | 2,41447 | 0,01008 | Out,2003 | 2,58687 | 2,24207 |
| 11 | 2,5441 | 0,40 | -0,16 | 0,00 | -0,06 | 2,53778 | 0,00004 | Nov,2003 | 2,71019 | 2,36538 |
| 12 | 2,6132 | 0,41 | -0,12 | 0,08 | -0,02 | 2,70828 | 0,00903 | Dez,2003 | 2,88068 | 2,53588 |
| 13 | 2,5739 | 0,41 | -0,07 | 0,12 | 0,03 | 2,84714 | 0,07466 | Jan,2004 | 3,01954 | 2,67474 |
| 14 | 2,7684 | 0,41 | -0,02 | 0,08 | 0,06 | 2,89170 | 0,01520 | Fev,2004 | 3,06410 | 2,71929 |
| 15 | 2,7996 | 0,40 | 0,03 | 0,00 | 0,05 | 2,83793 | 0,00147 | Mar,2004 | 3,01033 | 2,66553 |
| 16 | 2,7608 | 0,40 | 0,08 | -0,08 | -0,01 | 2,74553 | 0,00023 | Abr,2004 | 2,91793 | 2,57313 |
| 17 | 2,6178 | 0,38 | 0,13 | -0,12 | -0,05 | 2,69964 | 0,00670 | Mai,2004 | 2,87204 | 2,52724 |
| 18 | 2,6948 | 0,37 | 0,17 | -0,08 | -0,06 | 2,75346 | 0,00344 | Jun,2004 | 2,92586 | 2,58106 |
| 19 | 2,9041 | 0,35 | 0,21 | 0,00 | -0,02 | 2,89028 | 0,00019 | Jul,2004 | 3,06268 | 2,71788 |
| 20 | 3,2728 | 0,32 | 0,23 | 0,08 | 0,03 | 3,03165 | 0,05817 | Ago,2004 | 3,20405 | 2,85925 |
| 21 | 3,1871 | 0,30 | 0,25 | 0,12 | 0,06 | 3,08753 | 0,00992 | Set,2004 | 3,25993 | 2,91513 |
| 22 | 3,0561 | 0,27 | 0,26 | 0,08 | 0,05 | 3,01543 | 0,00165 | Out,2004 | 3,18783 | 2,84303 |
| 23 | 2,8593 | 0,23 | 0,26 | 0,00 | -0,01 | 2,84878 | 0,00011 | Nov,2004 | 3,02118 | 2,67638 |
| 24 | 2,5811 | 0,20 | 0,25 | -0,08 | -0,05 | 2,67508 | 0,00883 | Dez,2004 | 2,84748 | 2,50268 |
| 25 | 2,7468 | 0,16 | 0,23 | -0,12 | -0,06 | 2,57835 | 0,02837 | Jan,2005 | 2,75075 | 2,40595 |
| 26 | 2,5961 | 0,13 | 0,20 | -0,08 | -0,02 | 2,58441 | 0,00014 | Fev,2005 | 2,75682 | 2,41201 |
| 27 | 2,6537 | 0,09 | 0,16 | 0,00 | 0,03 | 2,64561 | 0,00006 | Mar,2005 | 2,81801 | 2,47321 |
| 28 | 2,6703 | 0,05 | 0,12 | 0,08 | 0,06 | 2,67436 | 0,00002 | Abr,2005 | 2,84676 | 2,50196 |
| 29 | 2,5889 | 0,01 | 0,07 | 0,12 | 0,05 | 2,60231 | 0,00018 | Mai,2005 | 2,77471 | 2,42991 |
| 30 | 2,4677 | -0,03 | 0,02 | 0,08 | -0,01 | 2,42527 | 0,00180 | Jun,2005 | 2,59767 | 2,25287 |
| 31 | 2,1432 | -0,07 | -0,03 | 0,00 | -0,05 | 2,20463 | 0,00377 | Jul,2005 | 2,37704 | 2,03223 |
| 32 | 1,8514 | -0,11 | -0,08 | -0,08 | -0,06 | 2,02622 | 0,03057 | Ago,2005 | 2,19862 | 1,85382 |

Tabela 19: Modelagem dos danos a rede, Set 2005 – Abr 2008

| Período meses | Dado | H1 | H2 | H8 | H9 | Modelo | DIF ² | Data | (+) IC | (-) IC |
|---------------|--------|-------|-------|-------|-------|---------|------------------|----------|---------|---------|
| 33 | 1,8381 | -0,15 | -0,13 | -0,12 | -0,02 | 1,94543 | 0,01152 | Set,2005 | 2,11783 | 1,77303 |
| 34 | 1,9037 | -0,19 | -0,17 | -0,08 | 0,03 | 1,95522 | 0,00265 | Out,2005 | 2,12762 | 1,78282 |
| 35 | 1,9707 | -0,22 | -0,21 | 0,00 | 0,06 | 1,99632 | 0,00066 | Nov,2005 | 2,16872 | 1,82392 |
| 36 | 2,0238 | -0,25 | -0,23 | 0,08 | 0,05 | 1,99988 | 0,00057 | Dez,2005 | 2,17228 | 1,82748 |
| 37 | 1,9220 | -0,28 | -0,25 | 0,12 | -0,01 | 1,93249 | 0,00011 | Jan,2006 | 2,10489 | 1,76009 |
| 38 | 1,8601 | -0,31 | -0,26 | 0,08 | -0,05 | 1,81431 | 0,00210 | Fev,2006 | 1,98671 | 1,64191 |
| 39 | 1,7461 | -0,34 | -0,26 | 0,00 | -0,06 | 1,70130 | 0,00201 | Mar,2006 | 1,87371 | 1,52890 |
| 40 | 1,6882 | -0,36 | -0,25 | -0,08 | -0,02 | 1,64695 | 0,00170 | Abr,2006 | 1,81935 | 1,47455 |
| 41 | 1,7930 | -0,38 | -0,23 | -0,12 | 0,03 | 1,67020 | 0,01508 | Mai,2006 | 1,84260 | 1,49780 |
| 42 | 1,7464 | -0,39 | -0,20 | -0,08 | 0,06 | 1,74911 | 0,00001 | Jun,2006 | 1,92151 | 1,57671 |
| 43 | 1,7764 | -0,40 | -0,16 | 0,00 | 0,05 | 1,84024 | 0,00408 | Jul,2006 | 2,01264 | 1,66784 |
| 44 | 1,9096 | -0,41 | -0,12 | 0,08 | -0,01 | 1,90729 | 0,00001 | Ago,2006 | 2,07970 | 1,73489 |
| 45 | 1,9760 | -0,41 | -0,07 | 0,12 | -0,05 | 1,93943 | 0,00134 | Set,2006 | 2,11183 | 1,76702 |
| 46 | 2,0307 | -0,41 | -0,02 | 0,08 | -0,06 | 1,95023 | 0,00647 | Out,2006 | 2,12263 | 1,77783 |
| 47 | 1,9907 | -0,40 | 0,03 | 0,00 | -0,02 | 1,96290 | 0,00077 | Nov,2006 | 2,13530 | 1,79050 |
| 48 | 2,0304 | -0,40 | 0,08 | -0,08 | 0,03 | 1,99475 | 0,00127 | Dez,2006 | 2,16715 | 1,82235 |
| 49 | 2,0570 | -0,38 | 0,13 | -0,12 | 0,06 | 2,05080 | 0,00004 | Jan,2007 | 2,22320 | 1,87840 |
| 50 | 2,1137 | -0,37 | 0,17 | -0,08 | 0,05 | 2,12658 | 0,00017 | Fev,2007 | 2,29898 | 1,95417 |
| 51 | 2,2039 | -0,35 | 0,21 | 0,00 | -0,01 | 2,21342 | 0,00009 | Mar,2007 | 2,38582 | 2,04102 |
| 52 | 2,1896 | -0,32 | 0,23 | 0,08 | -0,05 | 2,30033 | 0,01227 | Abr,2007 | 2,47273 | 2,12793 |
| 53 | 2,2420 | -0,30 | 0,25 | 0,12 | -0,06 | 2,37303 | 0,01717 | Mai,2007 | 2,54543 | 2,20063 |
| 54 | 2,3838 | -0,27 | 0,26 | 0,08 | -0,02 | 2,41575 | 0,00102 | Jun,2007 | 2,58816 | 2,24335 |
| 55 | 2,4145 | -0,23 | 0,26 | 0,00 | 0,03 | 2,41909 | 0,00002 | Jul,2007 | 2,59149 | 2,24668 |
| 56 | 2,3430 | -0,20 | 0,25 | -0,08 | 0,06 | 2,38997 | 0,00221 | Ago,2007 | 2,56237 | 2,21756 |
| 57 | 2,2565 | -0,16 | 0,23 | -0,12 | 0,05 | 2,35433 | 0,00957 | Set,2007 | 2,52674 | 2,18193 |
| 58 | 2,3481 | -0,13 | 0,20 | -0,08 | -0,01 | 2,34569 | 0,00001 | Out,2007 | 2,51809 | 2,17329 |
| 59 | 2,5997 | -0,09 | 0,16 | 0,00 | -0,05 | 2,38346 | 0,04675 | Nov,2007 | 2,55586 | 2,21106 |
| 60 | 2,5689 | -0,05 | 0,12 | 0,08 | -0,06 | 2,45555 | 0,01285 | Dez,2007 | 2,62795 | 2,28315 |
| 61 | 2,5379 | -0,01 | 0,07 | 0,12 | -0,02 | 2,52007 | 0,00032 | Jan,2008 | 2,69247 | 2,34767 |
| 62 | 2,5360 | 0,03 | 0,02 | 0,08 | 0,03 | 2,52978 | 0,00004 | Fev,2008 | 2,70218 | 2,35738 |
| 63 | 2,4771 | 0,07 | -0,03 | 0,00 | 0,06 | 2,46534 | 0,00014 | Mar,2008 | 2,63774 | 2,29294 |
| 64 | 2,4148 | 0,11 | -0,08 | -0,08 | 0,05 | 2,35439 | 0,00364 | Abr,2008 | 2,52679 | 2,18199 |

Nas figuras 37 e 38 estão apresentados os gráficos no tempo da função dano versus seu modelo inserido entre os intervalos de confiança, 95%, bem como o gráfico no tempo dos danos versus modelo e as harmônicas que o formam.

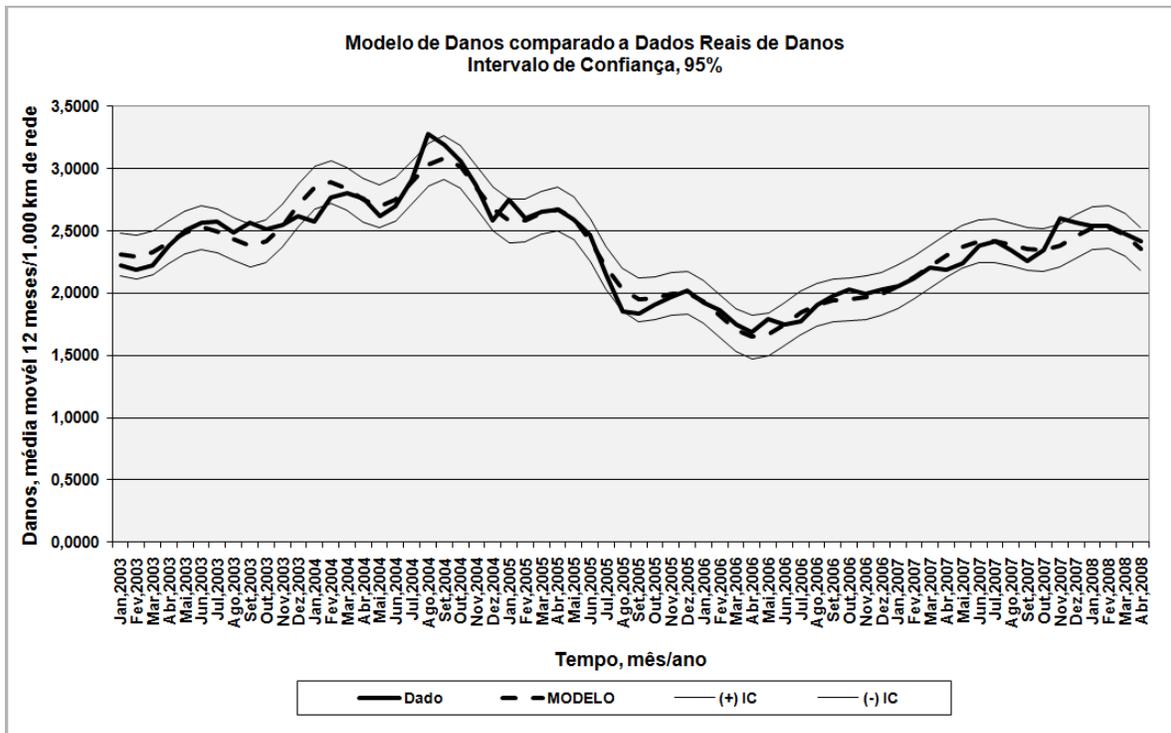


Figura 37: Modelo, danos a rede e intervalo de confiança.

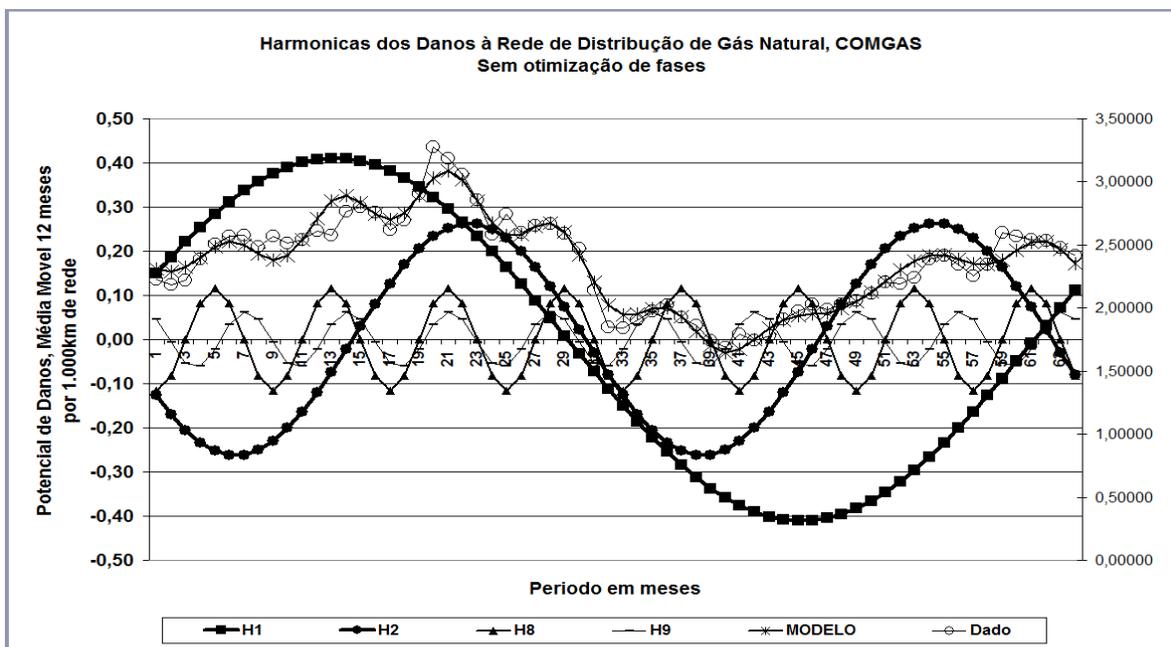


Figura 38: Modelo, danos a rede e harmônicas individuais.

5.2 Aderência do modelo a valores futuros

Os 31 dados restantes do período de maio de 2008 a novembro de 2010 foram utilizados para analisar a aderência do modelo aos dados futuros.

5.2.1 Modelagem de dados futuros

Como as harmônicas H1, H2, H8 e H9 são funções do tempo, t , e os demais parâmetros da série já são conhecidos, bastou apenas manipular a variável tempo, t , para valores posteriores a abril de 2008 e observar a aderência do modelo a valores futuros.

O resultado do proposto está contido na tabela 20, representam os dados posteriores de danos que vão de maio de 2008 a novembro de 2010, não utilizados na construção do modelo, porém comparado aos valores propostos pelo modelo com suas diferenças observadas frente ao intervalo de confiança de 95%, IC.

Observaram-se quatro regiões distintas na área gráfica dos dados futuros, conforme figura 39, com um deslocamento dos dados reais para baixo do limite inferior do intervalo de confiança do modelo a partir de agosto de 2008 a abril de 2010, área (2) e houve um deslocamento para cima no período de setembro de 2010 a novembro de 2010, área (4).

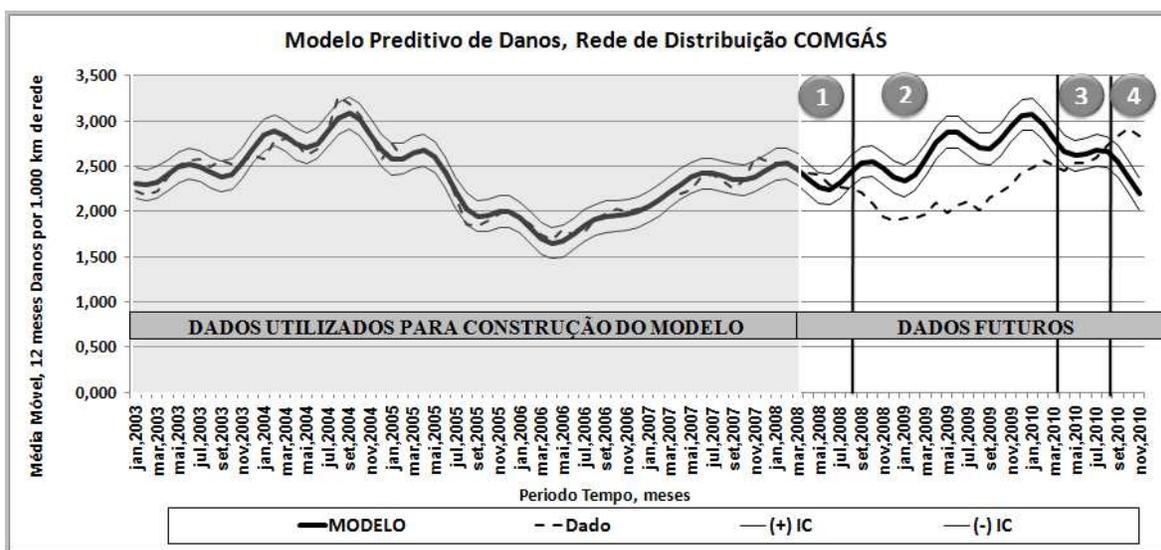


Figura 39: Comportamento futuro do modelo.

Tabela 20: Modelagem dos danos para valores futuros.

| Dado | H1 | H2 | H8 | H9 | MODELO | DIF ² | (+) IC | (-) IC | Mês amostragem | Verifica Dado x IC Modelo |
|------|-------|-------|-------|-------|--------|------------------|--------|--------|----------------|---------------------------|
| 2,40 | 0,15 | -0,13 | -0,12 | -0,01 | 2,26 | 0,02 | 2,43 | 2,09 | Mai, 2008 | Dentro |
| 2,29 | 0,19 | -0,17 | -0,08 | -0,05 | 2,24 | 0,00 | 2,41 | 2,07 | Jun, 2008 | Dentro |
| 2,26 | 0,22 | -0,21 | 0,00 | -0,06 | 2,32 | 0,00 | 2,49 | 2,14 | Jul, 2008 | Dentro |
| 2,25 | 0,25 | -0,23 | 0,08 | -0,02 | 2,44 | 0,04 | 2,61 | 2,27 | Ago, 2008 | Abaixo |
| 2,21 | 0,28 | -0,25 | 0,12 | 0,03 | 2,54 | 0,11 | 2,71 | 2,37 | Set, 2008 | Abaixo |
| 2,09 | 0,31 | -0,26 | 0,08 | 0,06 | 2,56 | 0,22 | 2,73 | 2,38 | Out, 2008 | Abaixo |
| 1,94 | 0,34 | -0,26 | 0,00 | 0,05 | 2,48 | 0,29 | 2,65 | 2,31 | Nov, 2008 | Abaixo |
| 1,90 | 0,36 | -0,25 | -0,08 | -0,01 | 2,38 | 0,23 | 2,55 | 2,21 | Dez, 2008 | Abaixo |
| 1,93 | 0,38 | -0,23 | -0,12 | -0,05 | 2,34 | 0,16 | 2,51 | 2,16 | Jan, 2009 | Abaixo |
| 1,92 | 0,39 | -0,20 | -0,08 | -0,06 | 2,41 | 0,24 | 2,58 | 2,24 | Fev, 2009 | Abaixo |
| 1,97 | 0,40 | -0,16 | 0,00 | -0,02 | 2,58 | 0,37 | 2,75 | 2,40 | Mar, 2009 | Abaixo |
| 2,10 | 0,41 | -0,12 | 0,08 | 0,03 | 2,76 | 0,44 | 2,94 | 2,59 | Abr, 2009 | Abaixo |
| 1,98 | 0,41 | -0,07 | 0,12 | 0,06 | 2,88 | 0,80 | 3,05 | 2,70 | Mai, 2009 | Abaixo |
| 2,06 | 0,41 | -0,02 | 0,08 | 0,05 | 2,87 | 0,66 | 3,05 | 2,70 | Jun, 2009 | Abaixo |
| 2,12 | 0,40 | 0,03 | 0,00 | -0,01 | 2,79 | 0,45 | 2,96 | 2,61 | Jul, 2009 | Abaixo |
| 2,01 | 0,40 | 0,08 | -0,08 | -0,05 | 2,70 | 0,47 | 2,87 | 2,53 | Ago, 2009 | Abaixo |
| 2,15 | 0,38 | 0,13 | -0,12 | -0,06 | 2,69 | 0,30 | 2,87 | 2,52 | Set, 2009 | Abaixo |
| 2,21 | 0,37 | 0,17 | -0,08 | -0,02 | 2,79 | 0,34 | 2,96 | 2,62 | Out, 2009 | Abaixo |
| 2,29 | 0,35 | 0,21 | 0,00 | 0,03 | 2,94 | 0,43 | 3,12 | 2,77 | Nov, 2009 | Abaixo |
| 2,44 | 0,32 | 0,23 | 0,08 | 0,06 | 3,06 | 0,39 | 3,23 | 2,89 | Dez, 2009 | Abaixo |
| 2,48 | 0,30 | 0,25 | 0,12 | 0,05 | 3,07 | 0,35 | 3,24 | 2,90 | Jan, 2010 | Abaixo |
| 2,57 | 0,27 | 0,26 | 0,08 | -0,01 | 2,96 | 0,16 | 3,14 | 2,79 | Fev, 2010 | Abaixo |
| 2,51 | 0,23 | 0,26 | 0,00 | -0,05 | 2,80 | 0,08 | 2,97 | 2,63 | Mar, 2010 | Abaixo |
| 2,45 | 0,20 | 0,25 | -0,08 | -0,06 | 2,67 | 0,05 | 2,84 | 2,50 | Abr, 2010 | Abaixo |
| 2,53 | 0,16 | 0,23 | -0,12 | -0,02 | 2,62 | 0,01 | 2,79 | 2,44 | Mai, 2010 | Dentro |
| 2,53 | 0,13 | 0,20 | -0,08 | 0,03 | 2,64 | 0,01 | 2,81 | 2,47 | Jun, 2010 | Dentro |
| 2,59 | 0,09 | 0,16 | 0,00 | 0,06 | 2,68 | 0,01 | 2,85 | 2,50 | Jul, 2010 | Dentro |
| 2,74 | 0,05 | 0,12 | 0,08 | 0,05 | 2,66 | 0,01 | 2,83 | 2,48 | Ago, 2010 | Dentro |
| 2,83 | 0,01 | 0,07 | 0,12 | -0,01 | 2,55 | 0,08 | 2,72 | 2,38 | Set, 2010 | Acima |
| 2,92 | -0,03 | 0,02 | 0,08 | -0,05 | 2,38 | 0,29 | 2,55 | 2,21 | Out, 2010 | Acima |
| 2,83 | -0,07 | -0,03 | 0,00 | -0,06 | 2,20 | 0,40 | 2,37 | 2,03 | Nov, 2010 | Acima |

Para verificar o comportamento das quatro harmônicas, H1, H2, H8 e H9 e sua influência sobre o observado na área gráfica referente aos dados futuros, foram primeiramente inseridas as harmônicas H1 e H2, de maior magnitude, e comparado visualmente seu comportamento sobreposto ao comportamento do modelo e dos dados reais, conforme ao gráfico da figura 40.

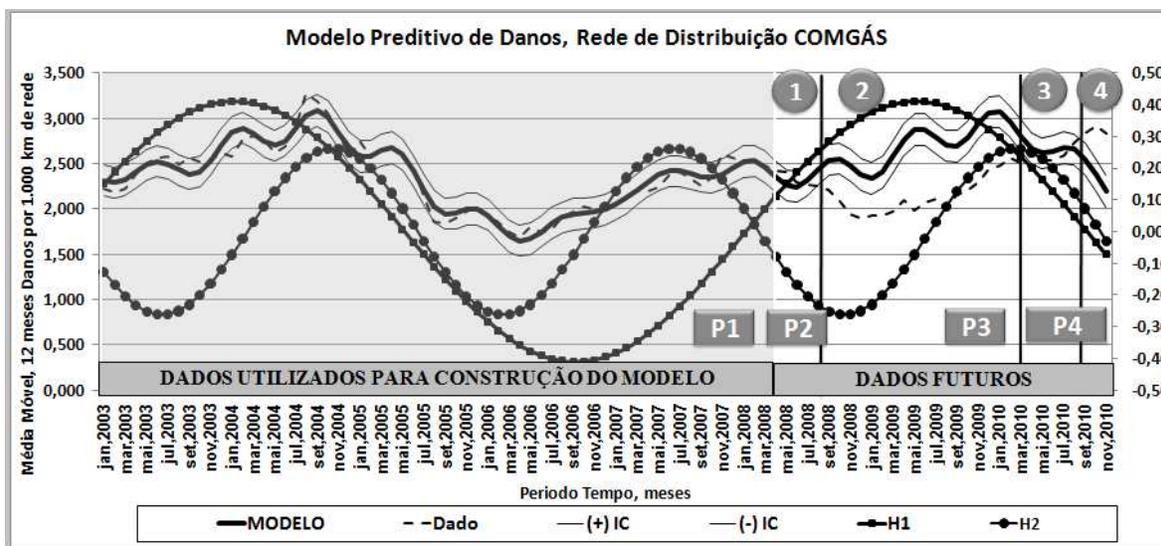


Figura 40: H1 e H2 sobre comportamento futuro.

Conforme visualizado graficamente na figura 40, H1 de fato tem um impacto crescente sobre o modelo dos danos elevando seu valor absoluto a partir de agosto de 2008, área (2) e distanciando o modelo dos dados reais, enquanto que H2 aparenta estar representando bem o modelo frente aos dados reais nessa mesma área.

Isso gerou uma hipótese intermediária de que a harmônica H1 foi suspensa a partir de P3 e reativada e reinicializada em P4 em conjunto com uma reinicialização de H2, pois é nesse período que se observa a inversão do comportamento entre modelo e dado real.

O passo seguinte foi eliminar H1 do modelo a partir de agosto de 2008 e manter as harmônicas H2, H8 e H9 como componentes controladoras da função dano e conforme a tabela 21 se observou a melhora da aderência do modelo.

Tabela 21: Modelagem dos danos para valores futuros sem H1.

| Período meses | Dado | H1 | H2 | H8 | H9 | MODELO | DIF ² | (+) IC | (-) IC | Mês amostragem | Verifica Dado x IC Modelo |
|---------------|------|-------|-------|-------|-------|--------|------------------|--------|--------|----------------|---------------------------|
| 65 | 2,40 | 0,15 | -0,13 | -0,12 | -0,01 | 2,26 | 0,02 | 2,43 | 2,09 | Mai, 2008 | Dentro |
| 66 | 2,29 | 0,19 | -0,17 | -0,08 | -0,05 | 2,24 | 0,00 | 2,41 | 2,07 | Jun, 2008 | Dentro |
| 67 | 2,26 | 0,22 | -0,21 | 0,00 | -0,06 | 2,32 | 0,00 | 2,49 | 2,14 | Jul, 2008 | Dentro |
| 68 | 2,25 | | -0,23 | 0,08 | -0,02 | 2,19 | 0,00 | 2,36 | 2,02 | Ago, 2008 | Dentro |
| 69 | 2,21 | | -0,25 | 0,12 | 0,03 | 2,26 | 0,00 | 2,43 | 2,08 | Set, 2008 | Dentro |
| 70 | 2,09 | | -0,26 | 0,08 | 0,06 | 2,24 | 0,02 | 2,42 | 2,07 | Out, 2008 | Dentro |
| 71 | 1,94 | | -0,26 | 0,00 | 0,05 | 2,14 | 0,04 | 2,32 | 1,97 | Nov, 2008 | Abaixo |
| 72 | 1,90 | | -0,25 | -0,08 | -0,01 | 2,02 | 0,01 | 2,19 | 1,85 | Dez, 2008 | Dentro |
| 73 | 1,93 | | -0,23 | -0,12 | -0,05 | 1,96 | 0,00 | 2,13 | 1,79 | Jan, 2009 | Dentro |
| 74 | 1,92 | | -0,20 | -0,08 | -0,06 | 2,02 | 0,01 | 2,19 | 1,84 | Fev, 2009 | Dentro |
| 75 | 1,97 | | -0,16 | 0,00 | -0,02 | 2,18 | 0,04 | 2,35 | 2,00 | Mar, 2009 | Abaixo |
| 76 | 2,10 | | -0,12 | 0,08 | 0,03 | 2,35 | 0,07 | 2,53 | 2,18 | Abr, 2009 | Abaixo |
| 77 | 1,98 | | -0,07 | 0,12 | 0,06 | 2,47 | 0,24 | 2,64 | 2,29 | Mai, 2009 | Abaixo |
| 78 | 2,06 | | -0,02 | 0,08 | 0,05 | 2,46 | 0,16 | 2,64 | 2,29 | Jun, 2009 | Abaixo |
| 79 | 2,12 | | 0,03 | 0,00 | -0,01 | 2,38 | 0,07 | 2,55 | 2,21 | Jul, 2009 | Abaixo |
| 80 | 2,01 | | 0,08 | -0,08 | -0,05 | 2,30 | 0,08 | 2,48 | 2,13 | Ago, 2009 | Abaixo |
| 81 | 2,15 | | 0,13 | -0,12 | -0,06 | 2,31 | 0,03 | 2,48 | 2,14 | Set, 2009 | Dentro |
| 82 | 2,21 | | 0,17 | -0,08 | -0,02 | 2,43 | 0,05 | 2,60 | 2,25 | Out, 2009 | Abaixo |
| 83 | 2,29 | | 0,21 | 0,00 | 0,03 | 2,60 | 0,09 | 2,77 | 2,43 | Nov, 2009 | Abaixo |
| 84 | 2,44 | | 0,23 | 0,08 | 0,06 | 2,74 | 0,09 | 2,91 | 2,57 | Dez, 2009 | Abaixo |
| 85 | 2,48 | | 0,25 | 0,12 | 0,05 | 2,77 | 0,09 | 2,95 | 2,60 | Jan, 2010 | Abaixo |
| 86 | 2,57 | | 0,26 | 0,08 | -0,01 | 2,70 | 0,02 | 2,87 | 2,52 | Fev, 2010 | Dentro |
| 87 | 2,51 | | 0,26 | 0,00 | -0,05 | 2,57 | 0,00 | 2,74 | 2,39 | Mar, 2010 | Dentro |
| 88 | 2,45 | | 0,25 | -0,08 | -0,06 | 2,47 | 0,00 | 2,64 | 2,30 | Abr, 2010 | Dentro |
| 89 | 2,53 | 0,16 | 0,23 | -0,12 | -0,02 | 2,45 | 0,01 | 2,62 | 2,28 | Mai, 2010 | Dentro |
| 90 | 2,53 | 0,13 | 0,20 | -0,08 | 0,03 | 2,51 | 0,00 | 2,68 | 2,34 | Jun, 2010 | Dentro |
| 91 | 2,59 | 0,09 | 0,16 | 0,00 | 0,06 | 2,59 | 0,00 | 2,76 | 2,41 | Jul, 2010 | Dentro |
| 92 | 2,74 | 0,05 | 0,12 | 0,08 | 0,05 | 2,61 | 0,02 | 2,78 | 2,44 | Ago, 2010 | Dentro |
| 93 | 2,83 | 0,01 | 0,07 | 0,12 | -0,01 | 2,54 | 0,08 | 2,72 | 2,37 | Set, 2010 | Acima |
| 94 | 2,92 | -0,03 | 0,02 | 0,08 | -0,05 | 2,41 | 0,26 | 2,58 | 2,24 | Out, 2010 | Acima |
| 95 | 2,83 | -0,07 | -0,03 | 0,00 | -0,06 | 2,27 | 0,31 | 2,44 | 2,10 | Nov, 2010 | Acima |

A figura 41 ajuda a visualizar o observado nessa segunda abordagem de predição de danos e verificar a aderência do modelo aos dados futuros sem a presença de H1 e a expectativa de comportamento.

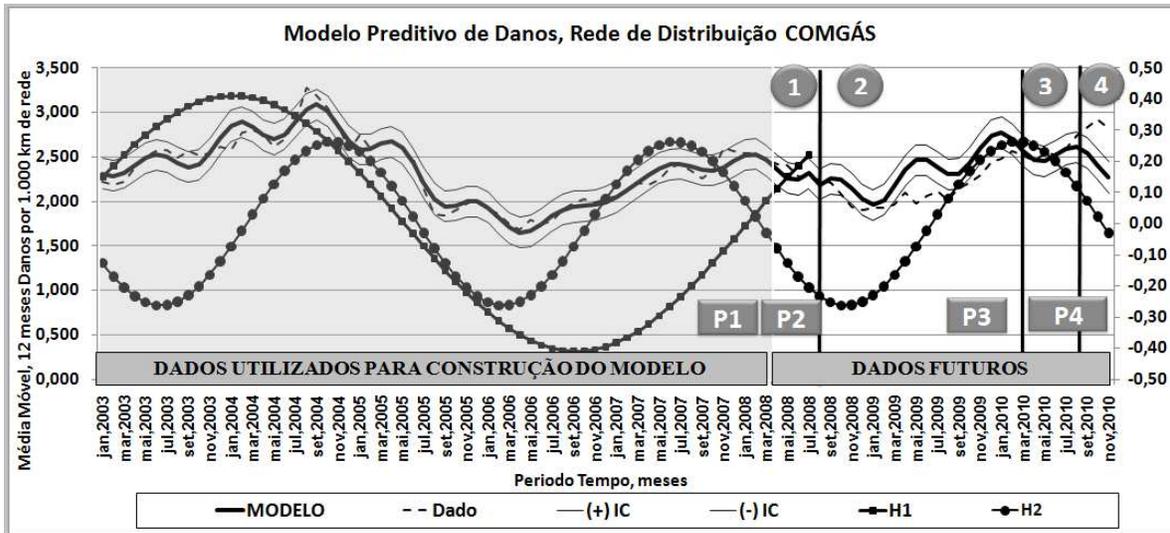


Figura 41: Modelo futuro sem H1.

Ao se remover H1, observou-se uma aproximação do modelo em relação aos dados reais, assumindo a mesma forma de curva, entretanto ainda ligeiramente acima do intervalo de confiança, isso, pois quando a harmônica H1 deixou de atuar, houve uma alteração do valor médio de danos que é a componente R_0 , offset, da equação 14, a equação do modelo.

Para corrigir a componente R_0 , offset, do modelo frente a essa possibilidade de suspensão de harmônicas, identificou-se como período P1 a área do gráfico da figura 40 que representa a região dos dados utilizados para a construção do modelo, como período P2 a área do gráfico que representa a região (1) de dados futuros onde o modelo representa os dados reais inseridos no IC, como Período P3 a área do gráfico da figura 40 que representa a região (2) de dados futuros onde o modelo ficou acima do dado real, e como período P4 a área do gráfico 40 que representa as regiões (3) e (4) de dados futuros onde o modelo inverteu o sentido e ficou abaixo do dado real.

A esses períodos P1, P2, P3 e P4 foram calculados os valores médios de danos, R_0 , offset da equação 14, e verificou-se que no período P2 o modelo ainda representava os

dados reais inseridos no IC de 95% e que no período P3, onde se acredita que houve a suspensão da harmônica H1 do modelo, houve uma redução de 8% no valor médio de danos que reduziu em 0, 1903.

Já no período P4, houve uma inversão do valor médio de danos, R_0 , offset da equação 14, que aumentou em 0, 3500. Nesse período o valor médio esta acima da média do período de modelagem e essa inversão é um indicio que a harmônica H1 voltou a atuar no processo de geração de danos, conforme descrito na tabela 22.

Tabela 22: Valores médios da função dano conforme o período.

| Valor Médio da Função Dano | Período meses | Mês amostragem |
|---|----------------------|--|
| MEDIA P1: R_0 2,3605 | 1 a 64 | Janeiro 2003 Julho 2008 |
| MÉDIA P2: R_0 DIFERENÇA, (P1-P2) 2,3170 0,0435 | 65 a 67 | Mai 2008 Jul 2008 |
| MÉDIA P3: R_0 DIFERENÇA, (P1-P3) 2,1702 0,1903 | 68 a 88 | Ago 2008 Abril, 2010 |
| MÉDIA P4: R_0 DIFERENÇA, (P1-P4) 2,7106 -0,3500 | 89 a 95 | Mai 2010 Nov. 2010 |

A terceira abordagem de interpretação do modelo então subtraiu de R_0 , offset da equação 14 a partir do período P3 o valor de 0, 1903 equivalente ao novo valor médio considerando a suspensão da harmônica H1.

Ao se fazer isso se observou que o modelo fica perfeitamente ajustado aos dados reais também para o período P3 confirmando parte da hipótese intermediária de suspensão da harmônica H1 conforme tabela 23 e gráfico da figura 41.

Tabela 23: Modelo futuro sem H1com R₀, offset corrigido em P3.

| Período meses | Dado | H1 | H2 | H8 | H9 | MODELO | DIF ² | (+) IC | (-) IC | Mês amostragem | Verifica Dado x IC Modelo |
|---------------|------|------|-------|-------|-------|--------|------------------|--------|--------|----------------|---------------------------|
| 65 | 2,40 | 0,15 | -0,13 | -0,12 | -0,01 | 2,26 | 0,02 | 2,43 | 2,09 | Mai, 2008 | Dentro |
| 66 | 2,29 | 0,19 | -0,17 | -0,08 | -0,05 | 2,24 | 0,00 | 2,41 | 2,07 | Jun, 2008 | Dentro |
| 67 | 2,26 | 0,22 | -0,21 | 0,00 | -0,06 | 2,32 | 0,00 | 2,49 | 2,14 | Jul, 2008 | Dentro |
| 68 | 2,25 | | -0,23 | 0,08 | -0,02 | 2,00 | 0,06 | 2,17 | 1,83 | Ago, 2008 | Acima |
| 69 | 2,21 | | -0,25 | 0,12 | 0,03 | 2,07 | 0,02 | 2,24 | 1,89 | Set, 2008 | Dentro |
| 70 | 2,09 | | -0,26 | 0,08 | 0,06 | 2,05 | 0,00 | 2,22 | 1,88 | Out, 2008 | Dentro |
| 71 | 1,94 | | -0,26 | 0,00 | 0,05 | 1,95 | 0,00 | 2,13 | 1,78 | Nov, 2008 | Dentro |
| 72 | 1,90 | | -0,25 | -0,08 | -0,01 | 1,83 | 0,00 | 2,00 | 1,66 | Dez, 2008 | Dentro |
| 73 | 1,93 | | -0,23 | -0,12 | -0,05 | 1,77 | 0,03 | 1,94 | 1,60 | Jan, 2009 | Dentro |
| 74 | 1,92 | | -0,20 | -0,08 | -0,06 | 1,83 | 0,01 | 2,00 | 1,65 | Fev, 2009 | Dentro |
| 75 | 1,97 | | -0,16 | 0,00 | -0,02 | 1,98 | 0,00 | 2,16 | 1,81 | Mar, 2009 | Dentro |
| 76 | 2,10 | | -0,12 | 0,08 | 0,03 | 2,16 | 0,00 | 2,34 | 1,99 | Abr, 2009 | Dentro |
| 77 | 1,98 | | -0,07 | 0,12 | 0,06 | 2,28 | 0,09 | 2,45 | 2,10 | Mai, 2009 | Abaixo |
| 78 | 2,06 | | -0,02 | 0,08 | 0,05 | 2,27 | 0,04 | 2,45 | 2,10 | Jun, 2009 | Abaixo |
| 79 | 2,12 | | 0,03 | 0,00 | -0,01 | 2,19 | 0,01 | 2,36 | 2,02 | Jul, 2009 | Dentro |
| 80 | 2,01 | | 0,08 | -0,08 | -0,05 | 2,11 | 0,01 | 2,29 | 1,94 | Ago, 2009 | Dentro |
| 81 | 2,15 | | 0,13 | -0,12 | -0,06 | 2,12 | 0,00 | 2,29 | 1,95 | Set, 2009 | Dentro |
| 82 | 2,21 | | 0,17 | -0,08 | -0,02 | 2,24 | 0,00 | 2,41 | 2,06 | Out, 2009 | Dentro |
| 83 | 2,29 | | 0,21 | 0,00 | 0,03 | 2,41 | 0,01 | 2,58 | 2,24 | Nov, 2009 | Dentro |
| 84 | 2,44 | | 0,23 | 0,08 | 0,06 | 2,55 | 0,01 | 2,72 | 2,38 | Dez, 2009 | Dentro |
| 85 | 2,48 | | 0,25 | 0,12 | 0,05 | 2,58 | 0,01 | 2,76 | 2,41 | Jan, 2010 | Dentro |
| 86 | 2,57 | | 0,26 | 0,08 | -0,01 | 2,51 | 0,00 | 2,68 | 2,33 | Fev, 2010 | Dentro |
| 87 | 2,51 | | 0,26 | 0,00 | -0,05 | 2,38 | 0,02 | 2,55 | 2,20 | Mar, 2010 | Dentro |
| 88 | 2,45 | | 0,25 | -0,08 | -0,06 | 2,28 | 0,03 | 2,45 | 2,11 | Abr, 2010 | Acima |
| 89 | 2,53 | | 0,23 | -0,12 | -0,02 | 2,26 | 0,07 | 2,43 | 2,09 | Mai, 2010 | Acima |
| 90 | 2,53 | | 0,20 | -0,08 | 0,03 | 2,32 | 0,04 | 2,49 | 2,15 | Jun, 2010 | Acima |
| 91 | 2,59 | | 0,16 | 0,00 | 0,06 | 2,40 | 0,04 | 2,57 | 2,22 | Jul, 2010 | Acima |
| 92 | 2,74 | | 0,12 | 0,08 | 0,05 | 2,42 | 0,10 | 2,59 | 2,25 | Ago, 2010 | Acima |
| 93 | 2,83 | | 0,07 | 0,12 | -0,01 | 2,35 | 0,23 | 2,52 | 2,18 | Set, 2010 | Acima |
| 94 | 2,92 | | 0,02 | 0,08 | -0,05 | 2,22 | 0,49 | 2,39 | 2,05 | Out, 2010 | Acima |
| 95 | 2,83 | | -0,03 | 0,00 | -0,06 | 2,20 | 0,40 | 2,37 | 2,03 | Nov, 2010 | Acima |

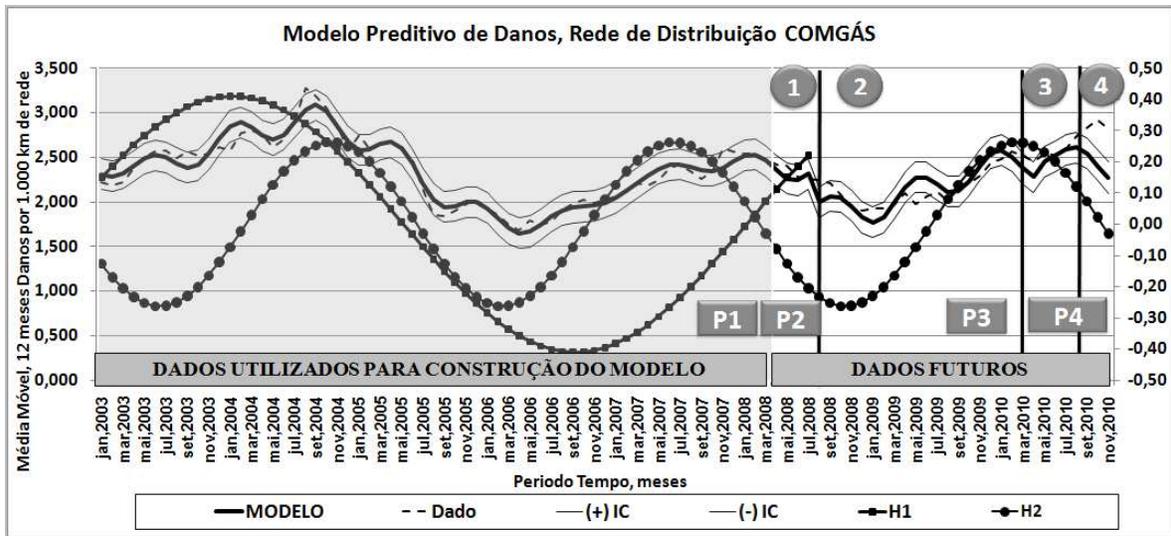


Figura 42: Modelo futuro sem H1 com R_0 , offset corrigido em P3.

A quarta abordagem complementa a hipótese intermediária na medida em que a harmônica H1 foi reativada e reinicializada em conjunto com a re-inicialização da harmônica H2 da partir de P4.

Adicionou-se sobre R_0 , offset da equação 14 a partir do período P4 o valor de 0, 3500 equivalente ao novo valor médio conforme tabela 22.

Ao se fazer isso se observou que o modelo ficou perfeitamente ajustado aos dados reais também para o período P4 confirmando a hipótese intermediária conforme tabela 24 e gráficos das figuras 43 e 44.

Tabela 24: Modelo futuro sem e com H1 com R_0 , offset corrigido em P3 e P4.

| Re Inicia | Período meses | Dado | H1 | H2 | H8 | H9 | MODELO | DIF ² | (+) IC | (-) IC | Data | Verifica Dado x IC Modelo |
|-----------|---------------|------|------|-------|-------|-------|--------|------------------|--------|--------|-----------|---------------------------|
| | 65 | 2,40 | 0,15 | -0,13 | -0,12 | -0,01 | 2,26 | 0,02 | 2,43 | 2,09 | Mai, 2008 | Dentro |
| | 66 | 2,29 | 0,19 | -0,17 | -0,08 | -0,05 | 2,24 | 0,00 | 2,41 | 2,07 | Jun, 2008 | Dentro |
| | 67 | 2,26 | 0,22 | -0,21 | 0,00 | -0,06 | 2,32 | 0,00 | 2,49 | 2,14 | Jul, 2008 | Dentro |
| | 68 | 2,25 | | -0,23 | 0,08 | -0,02 | 2,00 | 0,06 | 2,17 | 1,83 | Ago, 2008 | Acima |
| | 69 | 2,21 | | -0,25 | 0,12 | 0,03 | 2,07 | 0,02 | 2,24 | 1,89 | Set, 2008 | Dentro |
| | 70 | 2,09 | | -0,26 | 0,08 | 0,06 | 2,05 | 0,00 | 2,22 | 1,88 | Out, 2008 | Dentro |
| | 71 | 1,94 | | -0,26 | 0,00 | 0,05 | 1,95 | 0,00 | 2,13 | 1,78 | Nov, 2008 | Dentro |
| | 72 | 1,90 | | -0,25 | -0,08 | -0,01 | 1,83 | 0,00 | 2,00 | 1,66 | Dez, 2008 | Dentro |
| | 73 | 1,93 | | -0,23 | -0,12 | -0,05 | 1,77 | 0,03 | 1,94 | 1,60 | Jan, 2009 | Dentro |
| | 74 | 1,92 | | -0,20 | -0,08 | -0,06 | 1,83 | 0,01 | 2,00 | 1,65 | Fev, 2009 | Dentro |
| | 75 | 1,97 | | -0,16 | 0,00 | -0,02 | 1,98 | 0,00 | 2,16 | 1,81 | Mar, 2009 | Dentro |
| | 76 | 2,10 | | -0,12 | 0,08 | 0,03 | 2,16 | 0,00 | 2,34 | 1,99 | Abr, 2009 | Dentro |
| | 77 | 1,98 | | -0,07 | 0,12 | 0,06 | 2,28 | 0,09 | 2,45 | 2,10 | Mai, 2009 | Abaixo |
| | 78 | 2,06 | | -0,02 | 0,08 | 0,05 | 2,27 | 0,04 | 2,45 | 2,10 | Jun, 2009 | Abaixo |
| | 79 | 2,12 | | 0,03 | 0,00 | -0,01 | 2,19 | 0,01 | 2,36 | 2,02 | Jul, 2009 | Dentro |
| | 80 | 2,01 | | 0,08 | -0,08 | -0,05 | 2,11 | 0,01 | 2,29 | 1,94 | Ago, 2009 | Dentro |
| | 81 | 2,15 | | 0,13 | -0,12 | -0,06 | 2,12 | 0,00 | 2,29 | 1,95 | Set, 2009 | Dentro |
| | 82 | 2,21 | | 0,17 | -0,08 | -0,02 | 2,24 | 0,00 | 2,41 | 2,06 | Out, 2009 | Dentro |
| | 83 | 2,29 | | 0,21 | 0,00 | 0,03 | 2,41 | 0,01 | 2,58 | 2,24 | Nov, 2009 | Dentro |
| | 84 | 2,44 | | 0,23 | 0,08 | 0,06 | 2,55 | 0,01 | 2,72 | 2,38 | Dez, 2009 | Dentro |
| | 85 | 2,48 | | 0,25 | 0,12 | 0,05 | 2,58 | 0,01 | 2,76 | 2,41 | Jan, 2010 | Dentro |
| | 86 | 2,57 | | 0,26 | 0,08 | -0,01 | 2,51 | 0,00 | 2,68 | 2,33 | Fev, 2010 | Dentro |
| | 87 | 2,51 | | 0,26 | 0,00 | -0,05 | 2,38 | 0,02 | 2,55 | 2,20 | Mar, 2010 | Dentro |
| | 88 | 2,45 | | 0,25 | -0,08 | -0,06 | 2,28 | 0,03 | 2,45 | 2,11 | Abr, 2010 | Acima |
| 1 | 89 | 2,53 | 0,15 | -0,13 | -0,12 | -0,02 | 2,60 | 0,00 | 2,77 | 2,42 | Mai, 2010 | Dentro |
| 2 | 90 | 2,53 | 0,19 | -0,17 | -0,08 | 0,03 | 2,68 | 0,02 | 2,85 | 2,51 | Jun, 2010 | Dentro |
| 3 | 91 | 2,59 | 0,22 | -0,21 | 0,00 | 0,06 | 2,79 | 0,04 | 2,96 | 2,62 | Jul, 2010 | Abaixo |
| 4 | 92 | 2,74 | 0,25 | -0,23 | 0,08 | 0,05 | 2,86 | 0,01 | 3,03 | 2,69 | Ago, 2010 | Dentro |
| 5 | 93 | 2,83 | 0,28 | -0,25 | 0,12 | -0,01 | 2,85 | 0,00 | 3,02 | 2,68 | Set, 2010 | Dentro |
| 6 | 94 | 2,92 | 0,31 | -0,26 | 0,08 | -0,05 | 2,79 | 0,02 | 2,96 | 2,62 | Out, 2010 | Dentro |
| 7 | 95 | 2,83 | 0,34 | -0,26 | 0,00 | -0,06 | 2,73 | 0,01 | 2,90 | 2,55 | Nov, 2010 | Dentro |

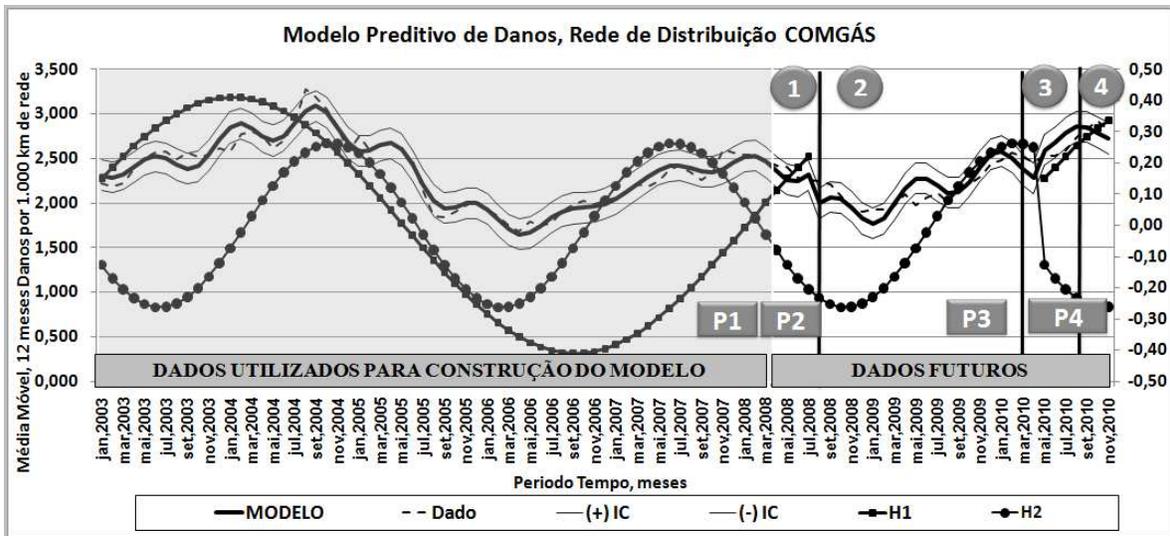


Figura 43: Modelo futuro sem e com H1 com R_0 , offset corrigido em P3 e P4.

No gráfico da figura 44 mantemos apenas as visualizações das variáveis danos, modelo e os respectivos intervalos de confiança inferior e superior para uma melhor visualização da aderência do modelo em relação aos quatro distintos períodos de análise, P1, P2, P3 e P4.

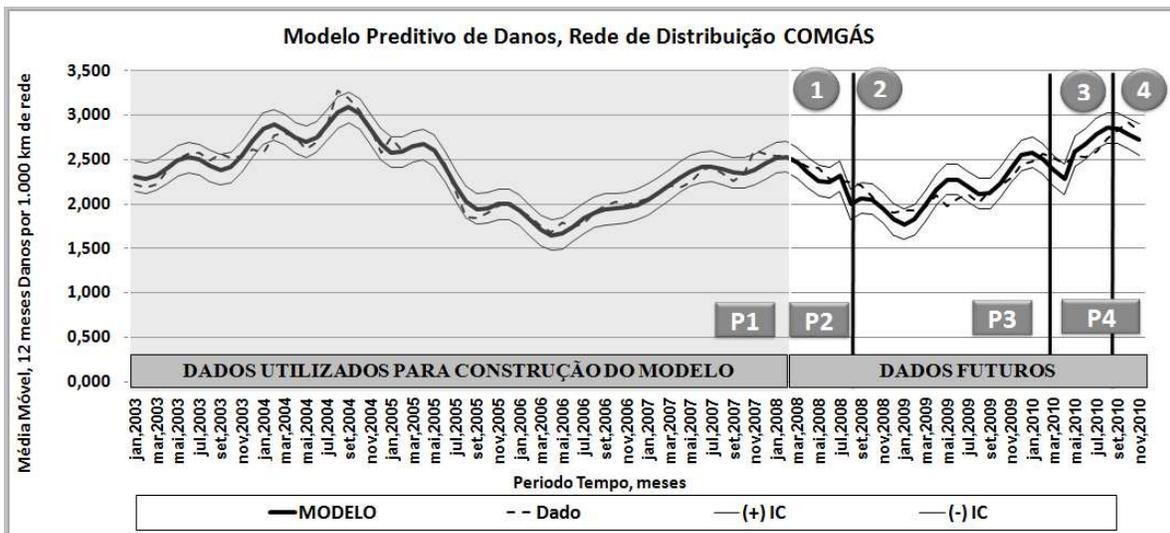


Figura 44: Modelo de danos corrigido para dados futuros

6 Conclusões e sugestões para trabalhos futuros

O primeiro paradigma vencido foi o de demonstrar à existência de forças cíclicas que regem a função danos a uma rede subterrânea de distribuição de gás natural localizada numa área de concessão composta de regiões metropolitanas.

A presença dessas quatro funções seguindo ciclos de 64, 32, 8 e 7 meses respectivamente, demonstra a complexidade de se prever os danos a rede uma vez que o subsolo em uma região metropolitana é compartilhado por múltiplas concessionárias de serviços além de estar sujeito aos planos de urbanização dos órgãos municipais bem como a obras de manutenção e expansão de diversas concessionárias de serviços públicos.

O segundo paradigma vencido foi que devido à presença de ciclos pode-se construir um modelo baseado nessas harmônicas para prever períodos que são mais susceptíveis a danos e assim intensificar os processos já existentes para sua prevenção.

Notou-se também a presença de um fenômeno sobre a harmônica H1 que é a de seu efeito ter desaparecido por um determinado período de tempo e de retornar novamente, e que nesse período, P3 da tabela 22, em que a harmônica H1 ficou fora de atuação entre agosto de 2008 e abril de 2010 o índice médio de danos recuou em 8% aproximadamente.

A harmônica H2 teve seu ciclo reiniciado quando H1 retorna em P4 da tabela 22, maio de 2010, o que indica que deve haver aparente relação de dependência dessas duas harmônicas.

No que se referem as harmônica H8, e H9 as duas de menor magnitude no espectro dos danos, notamos que em todo o período analisado elas se mantiveram presentes e sem nenhuma alteração de ciclo.

Esse período em que H1 ficou suspensa coincide com o auge e supressão da crise do *subprime*² americano e a crise da **zona do euro**³, (BBC NEWS, 2011), que desencadearam a crise financeira internacional de 2008.

Produto Interno Bruto – Variação Percentual em relação ao ano anterior

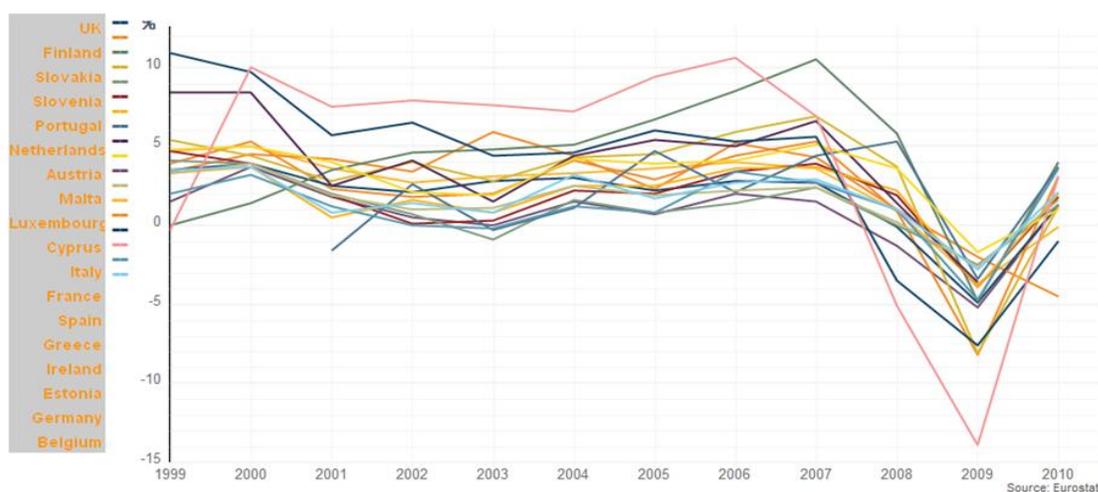


Figura 45: Adaptado de Variação percentual do PIB, países da zona do euro, fonte: (BBC NEWS, 2011).

6.1 Uma nova hipótese – Fatores econômicos internos e externos

Esse trabalho seguiu modelo de pesquisa científica sendo de caráter exploratório à medida que não há informações a respeito dessa abordagem preditiva sobre a prevenção de danos e também com um caráter intermediário à medida que possibilita um novo horizonte de pesquisas.

Pensando na continuidade desse trabalho agora se cogita uma nova hipótese, “A influência de aspectos de crescimento econômico brasileiro e internacional influenciando os ciclos de danos a rede de gás natural”.

² É um crédito de risco, concedido a um tomador que não oferece garantias suficientes para se beneficiar de taxa de juros mais vantajosa.

³ Refere-se a uma união monetária dentro da União Europeia, na qual alguns Estados-membros adotaram oficialmente o euro como moeda comum.

Partindo-se do princípio que o desenvolvimento econômico gera necessidades de investimento em infraestrutura em geral, isso implica em investimentos de expansão e modernização de todas as concessionárias.

Como vimos esses investimentos em modernização e expansão das diversas concessionárias de serviços públicos passam pelo uso do subsolo gerando obras e, portanto interferindo no índice de danos.

Entretanto é necessário saber se esses investimentos são cíclicos e seguem frequências e amplitudes determinadas de forma a interferir diretamente no ciclo de danos.

No âmbito interno, criado em 1951, o Instituto Brasileiro de Economia (IBRE), da Fundação Getulio Vargas, dedica-se à produção e à divulgação de estatísticas macroeconômicas e pesquisas econômicas aplicadas.

Pioneiro no cálculo do PIB brasileiro o IBRE criou ainda o IGP, Índice Geral de Preços, que durante muitos anos foi o índice oficial da inflação e dentre as estatísticas econômicas produzidas pelo IBRE, destacam-se, além dos índices de preço, as sondagens de tendência e ciclos de negócio. Todos os indicadores são amplamente utilizados por estudiosos, analistas da economia brasileira e gestores das esferas públicas e privadas (INSTITUTO BRASILEIRO DE ECONOMIA, 2009).

O IBRE possui um comitê denominado Comitê de Datação de Ciclos Econômicos (CODACE) que tem como finalidade estabelecer cronologias de referência para os ciclos econômicos brasileiros.

A determinação de ciclos econômicos por um comitê independente contribui para dar maior eficiência às políticas econômicas governamentais e à alocação de recursos no âmbito privado, além de servir como referência para pesquisas acadêmicas de naturezas diversas. A forma de organização e método de trabalho do CODACE segue o modelo adotado em diversos países, com destaque para o Comitê de Datação norte-americano,

criado em 1978 pelo *National Bureau of Economic Research* (NBER) (FUNDAÇÃO GETULIO VARGAS, 2009).

Em suas primeiras reuniões foram estabelecidas datações mensais e trimestrais para os ciclos de negócios ocorridos de 1980 em diante. Segundo o Comitê, considerando-se a datação mensal, a última recessão brasileira durou seis meses, entre o pico de atividade econômica de julho de 2008 e o vale de janeiro de 2009 (INSTITUTO BRASILEIRO DE ECONOMIA, 2009).

No âmbito externo, sabe-se que a flutuação nos preços dos ativos é um processo natural de mudança de expectativas e incorporação de informações e que pode conduzir a um comportamento cíclico. Existem diferentes tipos de ciclos econômicos que podem ser divididos em função de suas causas ou de sua duração, e muitos têm efeitos sobre os mercados financeiros (RODRIGO OCTAVIO MARQUES DE ALMEIDA, 2009).

A duração do ciclo está relacionada à natureza específica da atividade. Cada um deles pode estar relacionado a uma flutuação nos mercados financeiros, representando oportunidades na alocação de ativos (RODRIGO OCTAVIO MARQUES DE ALMEIDA, 2009).

Os seis tipos de ciclo são:

1. Ciclos Agrícolas
2. Ciclos de Estoques
3. Ciclos Eleitorais
4. Ciclos de Investimento em Capital
5. Ciclos de Construção
6. Ciclos de Kondratieff

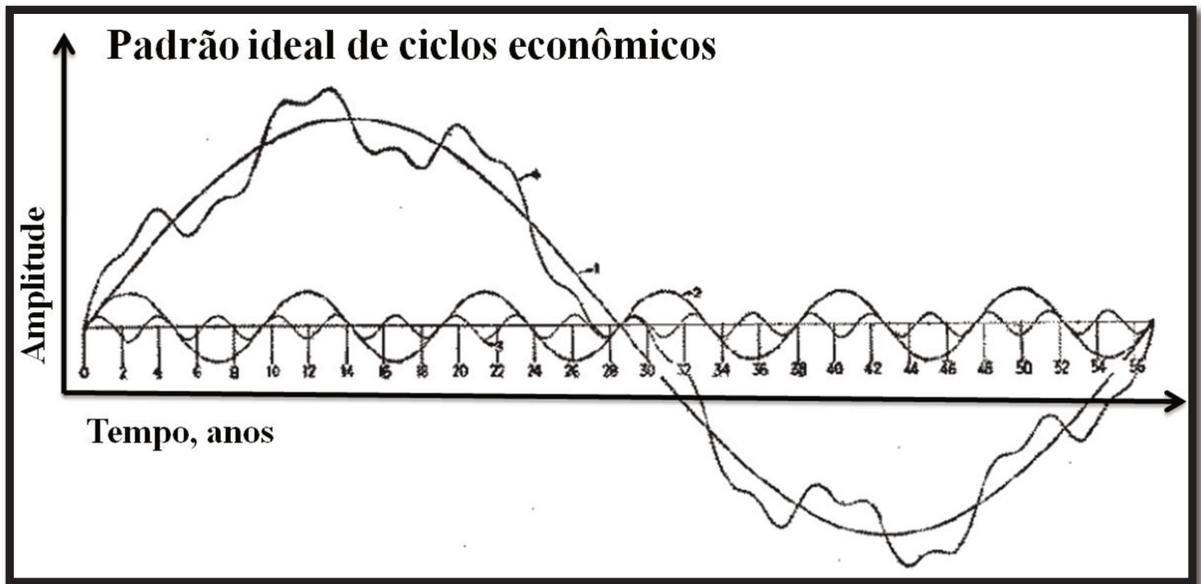


Figura 46: Adaptado de ciclos econômicos (RODRIGO OCTAVIO MARQUES DE ALMEIDA, 2009)

A busca de regularidades históricas é uma ferramenta importante na determinação dos cenários e na elaboração de estratégias e de carteiras. Os responsáveis por programar as políticas econômicas podem suavizar os ciclos, mas não têm como evitá-los (RODRIGO OCTAVIO MARQUES DE ALMEIDA, 2009).

Portanto é possível abrir uma nova linha de pesquisa para avaliar a nova hipótese, “A influência de aspectos de crescimento econômico brasileiro e internacional influenciando os ciclos de danos a rede de gás natural”.

6.2 Resultados Mensuráveis

6.2.1 Confirmação da hipótese

Hipótese:

“A ocorrência de danos em uma rede subterrânea de distribuição de gás natural localizada numa área de concessão composta de regiões metropolitanas pode ser prevista por um modelo de harmônicas de diferentes frequências e amplitudes”.

Confirmação da hipótese:

- ✓ Existem quatro harmônicas responsáveis por 63% da magnitude dos danos.
- ✓ Obteve-se um modelo harmônico de danos com Intervalo de Confiança da ordem de 95% e coeficiente de determinação da ordem de 94%.

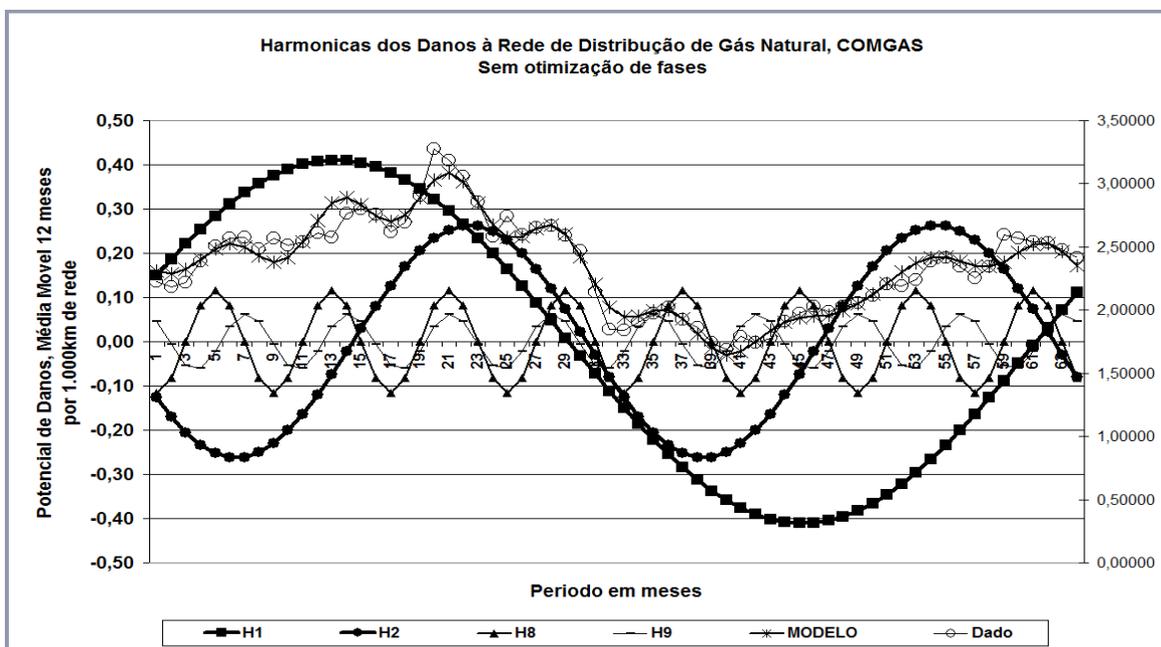


Figura 47: Comprovação de hipótese da existência de harmônicas.

6.2.2 Cumprimento dos objetivos

Objetivos:

1. Aplicou-se a transformada de Fourier à série de danos da concessionária Comgás.
2. Montou-se o periodograma da série, identificando a presença de quatro harmônicas.
3. Construiu-se a no domínio do tempo as harmônicas de maior amplitude.
4. Obteve-se a função dano como somatória das harmônicas de maior amplitude.
5. O modelo com a série original de danos esta inserido num intervalo de confiança de 95% e índice de determinação de 94%

6.2.3 Resultados extras

1. Quatro funções harmônicas seguindo ciclos de 64, 32, 8 e 7 meses.
2. Saída de H1 entre Agosto de 2008 e Abril de 2010.
3. Inicialização de H2 com o retorno de H1 em Maio de 2010.

6.3 Resultados não mensuráveis

1. Ineditismo da abordagem sobre Predição de Danos.
2. Possibilita iniciar uma pesquisa de aprofundamento, identificação das harmônicas.
3. Possibilita iniciar uma pesquisa de finalização, identificando meios de mitigação.
4. Aparente relação de dependência entre as harmônicas H1 e H2.

Pelo ineditismo dessa abordagem que inicia a construção do conhecimento sobre Modelagem de Predição de Danos, será possível o desenvolvimento de pelo menos mais duas linhas de pesquisa, uma de *aprofundamento* identificando quem são as harmônicas e outra de *finalização* identificando sua mitigação.



Figura 48: Possibilidade de continuidade

7 Referencias bibliográficas

(ABERDEEN, 2008)

ABERDEEN, The University Of. **PX3506 Advanced Practical Physics: Analysis of time series data using Fourier Techniques.** Disponível em:

<<http://www.abdn.ac.uk/~wpe001/px3506/index.html>>. Acesso em: 10 jul. 2008.

(ABRATT - MND, 2008)

ABRATT - MND (Brasil). **III CONGRESSO BRASILEIRO DE MND e I NoDIG AMÉRICA LATINA: CURSO DE PERFURAÇÃO HORIZONTAL DIRECIONAL.** São Paulo: Abratt, 2008. Sergio A. Palazzo.

(ALMEIDA, 2009)

ALMEIDA, Rodrigo Octavio Marques de. **Ciclos econômicos de longo prazo e o comportamento cíclico dos ativos financeiros.** informações fipe. Disponível em:

<http://www.fipe.org.br/publicacoes/downloads/bif/2009/4_36-41-rodr.pdf>. Acesso em: 10 abr. 2009.

(ANP, 2010)

ANP (Brasil). A. **O gás natural liquefeito no Brasil: Experiência da ANP na implantação dos projetos de importação de GNL.** Disponível em: <<http://www.anp.gov.br/?id=428>>.

Acesso em: 1 out. 2010.

(BBC NEWS, 2011)

BBC NEWS (England) (Comp.). **In graphics: The eurozone: Annual GDP growth - percentage change from previous year.** Disponível em:

<<http://www.bbc.co.uk/news/business-13361934>>. Acesso em: 12 maio 2011.

(BRASIL ANP, 2008)

BRASIL ANP. Haroldo Borges Rodrigues Lima. Diretor-geral (Comp.). **Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis – ANP: BOLETIM MENSAL DO GÁS NATURAL.** Disponível em: <<http://www.anp.gov.br/>>. Acesso em: 31 dez. 2008.

(BP GLOBAL STATISTICS, 2008)

BP GLOBAL STATISTICS (London). **BP Statistical Review of World Energy: June 2008.** Disponível em: <2011bp.com/statisticalreview>. Acesso em: 1 jun. 2008.

(COMGÁS – origem GN, 2009)

COMGÁS (Org.). **Conheça o gás natural: A origem do gás natural.** Disponível em:

<http://www.comgas.com.br/conheca_gasnatural/media/pdf/ahistoriadogas.pdf>. Acesso em: 10 abr. 2009.

(COMGAS - PPD, 2011)

COMGAS - PPD (Brasil). **Manual do Plano de Prevenção de Danos - PPD.** Disponível em: <http://www.comgas.com.br/instalacao_reformas/media/pdf/PPD.pdf>. Acesso em: 10 out. 2011.

(COMGAS – RIP, 2009)

COMGAS (Org.). **Relação com construtoras**. Baixe o RIP. Disponível em:

<http://www.comgas.com.br/instalacao_reformas/relacao/rip.asp>

Acesso em: 10 abr. 2009.

(COMGAS – composição GN, 2009)

COMGAS (Org.). **Conheça o gás natural**: A composição do Gás Natural. Disponível em:

<http://www.comgas.com.br/conheca_gasnatural/conheca/composicao.asp>. Acesso em: 10

abr. 2009.

(COMGAS – aplicação GN, 2009)

COMGAS (Org.). **10 anos de nova gestão**: Aplicação do gás natural. Disponível em:

<<http://www.comgas.com.br/paginacao/navega.html>>. Acesso em: 10 abr. 2009.

(COMGAS – concessão GN, 2009)

COMGAS (Org.). **Conheça o gás natural**: Área de concessão do gás natural. Disponível

em: <http://www.comgas.com.br/conheca_comgas/concessao/concessao.asp>. Acesso em:

10 abr. 2009.

(COMGAS – caminho GN, 2009)

COMGAS (Org.). **A Comgás e a sociedade**: Caminho do gás natural.

Disponível em:

<http://www.comgas.com.br/conheca_sociedade/media/jogos/mapa/index.html>. Acesso

em: 10 abr. 2009.

(FARIA; TECHNE, 2009)

FARIA, Renato; TECHNE, Revista. **Subsolo congestionado**. Disponível em:

<<http://www.revistatechne.com.br/engenharia-civil/140/imprime117302.asp>>.

Acesso em: 10 abr. 2009

(FOSSA et al., 2010)

FOSSA, Alberto José et al. **Normatização e regulamentação aplicadas à distribuição do gás natural**. 1º Brasília: Senai, 2010.

(FUNDAÇÃO GETULIO VARGAS, 2009)

FUNDAÇÃO GETULIO VARGAS (Brasil). **CODACE**. ibre. Disponível em:

<http://iepecdg.com.br/uploads/artigos/090527_comite_datacao.pdf>. Acesso em: 27 maio 2009.

(GASNET, 2009)

GASNET, O Site do Gás Natural. **Distribuidoras**: Gasodutos. Disponível em:

<http://www.gasnet.com.br/novo_distribuidoras.asp>. Acesso em: 10 abr. 2009.

(INSTITUTO BRASILEIRO DE ECONOMIA, 2009)
INSTITUTO BRASILEIRO DE ECONOMIA (Brasil). **O IBRE**. Fundação Getulio Vargas. Disponível em:
<<http://portalibre.fgv.br/main.jsp?lumChannelId=402880811D8E34B9011D97C0DC27007C>>. Acesso em: 27 maio 2009.

(LATORRE; CARDOSO, 2001)
LATORRE, Maria do Rosário Dias de Oliveira; CARDOSO, Maria Regina Alves. Análise de séries temporais em epidemiologia: uma introdução sobre aspectos metodológicos. **Revista Brasileira de Epidemiologia**, São Paulo, v. 4, n. 3, p.145-152, nov. 2001.
(MORETTIN; TOLOI, 1985)
MORETTIN, PA; TOLOI, CMC. **Previsão de séries temporais**. 2° São Paulo: Atual, 1985.

(PETROBRAS, 2010)
PETROBRAS. **Seminário sobre gás**. Disponível em:
<http://www.petrobras.com.br/minisite/premiotecnologia/pdf/TecnologiaGas_Seminario_GAS.pdf>. Acesso em: 10 abr. 2010.

(POR BAIXO DA TERRA, 2011)
POR BAIXO DA TERRA: Mapa digital revela a parte subterrânea de São Paulo. O Estado de São Paulo, 18 out. 2011

(RODRIGO OCTAVIO MARQUES DE ALMEIDA, 2009)
RODRIGO OCTAVIO MARQUES DE ALMEIDA (Brasil). **Ciclos econômicos de longo prazo e o comportamento cíclico dos ativos financeiros**. Fundação Instituto de Pesquisas Econômicas . Disponível em:
<http://www.fipe.org.br/publicacoes/downloads/bif/2009/4_36-41-rodr.pdf>. Acesso em: 10 abr. 2009

(SIMONOFF; RESTREPO; ZIMMERMAN, 2009)
SIMONOFF, Jeffrey S.; RESTREPO, Carlos E.; ZIMMERMAN, Rae. Risk management of cost consequences in natural gas transmission and distribution infrastructures. **Journal Of Loss Prevention In The Process Industries: The International Journal of Chemical and Process Plant Safety**, New York, p. 269-279. 12 out. 2009.

(SODRÉ, 2003)
SODRÉ, Ulysses. **Transformadas de Fourier**. Disponível em:
<<http://www.mat.uel.br/matessencial/superior/pdfs/tfourier.pdf>>. Acesso em: 6 maio 2003.

(STOFFER, 1991)
STOFFER, David S.. Walsh-Fourier Analysis and Its Statistical Applications. **Journal Of The American Statistical Association**, Alexandria Vaa, p. 461-485. 1 jun. 1991.

(WISEGEEK; SMITH, 2010)

WISEGEEK; SMITH, S.e.. **What Is a Pipe Locator?** Disponível em:

<<http://www.wisegeek.com/what-is-a-pipe-locator.htm>>. Acesso em: 10 abr. 2010.

(ZILL; CULLEN, 2009)

ZILL, Dennis G.; CULLEN, Michael R.. **Matemática Avançada para Engenharia**. 3^oed.
Porto Alegre: Bookman, 2009.

Apêndice A

A seguir a integra do material obtido na referencia (ABERDEEN, 2008) utilizado como modelo de algoritmo para realização da transformada de Fourier, periodograma e modelagem de função baseada nas soma das harmônicas pelo uso das series de Fourier.

PX3506 Advanced Practical Physics

Analysis of time series data using Fourier Techniques

7.1 Objectives

- To learn how to model time series data using Fourier techniques
- To gain advanced Excel skills using the Fourier Transform and Solver tools
- To calculate the Fourier coefficients and generate the periodogram of a periodic time series
- To apply these skills to determine epidemic thresholds in human disease data

| |
|---|
| AS YOU PERFORM THIS PRACTICAL, THERE ARE A NUMBER OF GRAPHS YOU NEED TO GENERATE AND QUESTIONS TO ANSWER. THESE HAVE BEEN REFERENCED IN THIS SCRIPT WITH ROMAN NUMERALS AND |
|---|

7.2 Introduction

Time series analysis is concerned with data which consist of time-ordered sequences of measurements on some phenomenon of interest. These phenomena include, rainfall and other weather measurements (with a strong emphasis on forecasting), signal processing (physical and engineering sciences), financial (e.g. stock market prices) and biological data sets (e.g. incidence of disease in a population).

Spectral analysis can be applied to a time series to explore cyclical patterns within these data. The purpose of the analysis is to decompose a complex time series with cyclical components into a few underlying sinusoidal (sine and cosine) functions of particular wavelengths. The term “spectrum” provides an appropriate metaphor for the nature of this analysis: Suppose you study a beam of white light, which at first looks like a random (white noise) accumulation of light at different wavelengths. However, when you put through a prism, we can separate the different wavelengths or cyclical components that make up “white” sunlight. In fact, via this technique we can now identify and distinguish between different sources of light. Thus, by identifying the important underlying cyclical components, we have learnt something about the phenomenon of interest. In essence performance of spectral analysis on a time series is like putting the series through a prism in order to identify the wavelengths and importance of underlying cyclical components. As a result of a successful analysis one might uncover just a few recurring cycles of different lengths in the time series of interest, which at first looked more or less like random noise.

7.3 Periodic Function

A periodic function $f(t)$ is one which repeats itself such that $f(t) = f(t+T)$. Where T is the period.

The natural function to model a periodic component in a time series is:

$$y = R \cos(\omega t - \phi) \quad (1)$$

where:

ω is the frequency of the periodic variation = $2\pi/\text{period}$

R is the amplitude

ϕ is the phase

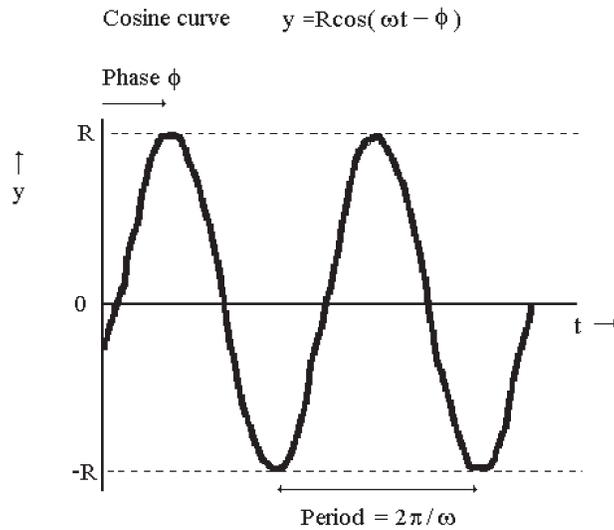


Figure 1. Cosine curve representation of the periodic component of a time series

In 1807, Fourier demonstrated that any periodic signal can be decomposed into a series of sinusoidal curves such as the one above, corresponding to each possible frequency in the signal. The signal in Figure 2 is the sum of the 4 sinusoidal curves in figure 3 plus a constant term.

Joseph Fourier (1768-1830)
 French mathematician, known also as an Egyptologist and administrator, who exerted strong influence on mathematical physics through his *Théorie analytique de la chaleur* (1822; *The Analytical Theory of Heat*). He showed how the conduction of heat in solid bodies may be analyzed in terms of infinite mathematical series now called by his name.

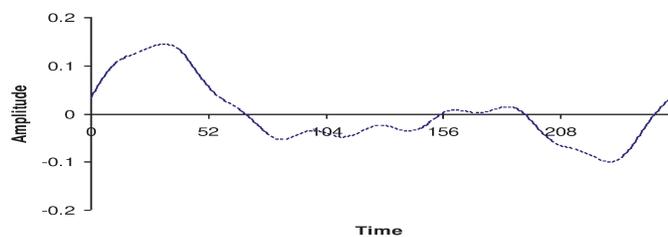


Figure 2. Random time series or structured data?

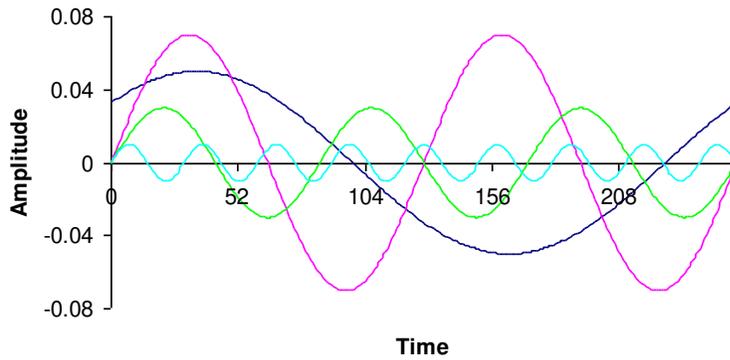


Figure 3. Sinusoidal decomposition of figure 2.

Generally, a signal of n data points can be perfectly described by $n/2$ sinusoidal curves (Fourier series).

Equation (1) can be expressed in terms of a cosine and sine wave using the following argument.

Since:

$$\cos(a-b) = \cos(a)\cos(b) + \sin(a)\sin(b)$$

$$y = R\cos(\omega t - \phi)$$

can be expressed in the form

$$y = R(\cos(\omega t)\cos(\phi) + \sin(\omega t)\sin(\phi))$$

By setting:

$$a = R\cos(\phi) \quad \text{and} \quad b = R\sin(\phi)$$

The expression becomes:

$$y = a\cos(\omega t) + b\sin(\omega t) \quad (2)$$

- (i) Show in your lab book the relationship between R and a , b by elimination of ϕ and similarly the relationship between ϕ and a , b by elimination of R .

In general for an infinite time series, it is made up of an infinite number of “harmonics”:

$$y = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos \omega_n t + b_n \sin \omega_n t) \quad (3)$$

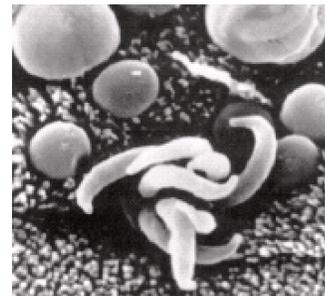
where $a_0/2$ is an offset (the mean value of y) and $\omega_2 = 2\omega_1$ and $\omega_3 = 3\omega_1$ etc.

Fortunately, time series data are usually not infinite. Hence for a 256 point time series, there are $256/2 = 128$ series (often called harmonics).

Part 1. Manual calculation of a single Fourier coefficient in Excel

In the last section we described how a periodic function can be described by a Fourier Series. Now we will represent the results of analysing a data series in terms of the Fourier Transform. The Fourier transform converts a signal expressed as a function of time to a function of frequency. The Fourier transform enables transfer between time and frequency without loss of information. Here we will calculate the Fourier coefficients of the first harmonic of a time series (1997-2001) of *Cryptosporidium* cases in England and Wales.

Cryptosporidium is a parasite which causes stomach infections. The usual route of infection is by drinking contaminated water. In Aberdeen there was an outbreak alleged to be caused by contaminated water in January – March 2002.



Load the file rawcrypto.xls into Excel
Activate Sheet 1 of the worksheet

(ii) Plot a graph using Excel of cases per week against time in weeks

For simplification of calculation, the time series includes 256 data points whereas in 5 years there are really 260 weeks. (Later when you use the Excel Fast Fourier Transform option it requires the number of data points to be to the power of 2.). Calculation of a single Fourier coefficient requires 4 steps: generating a sinusoidal curve over the period to be tested, multiplication of the signal by the sine curve, getting the area under the product curve and adjusting the phase to maximise the area under the curve.

1. Generating a sinusoidal curve of a given period to test

The equation of a simple sinusoidal curve is:

$$y = \cos\omega t$$

The frequency ω , can be expressed as:

$$\omega = 2\pi/T$$

Where T is the period. Expressing the frequency in periods yields:

$$y = \cos(2\pi t/T)$$

Visual review of the data should indicate an annual variation. We start to determine the Fourier coefficient that corresponds to 1 oscillation every year. Thus the period is 52 weeks. We define the period as a parameter in the spreadsheet, so that we can modify it later.

Enter the following cells in the spreadsheet:

'Parameter' in cell F2

'Period' in cell F4

'52' in cell G4

'Frequency' in cell F5.

The frequency is the number of oscillations over the entire period

'=256/\$G\$4' in cell G5

'Cosine in cell C2

'=COS(2*PI()*\$A3/\$G\$4)' in cell C3

Copy the formula in C3 to the range C4 to C258

The

(iii) Plot a graph showing the cosine curve.

2. Get the product of the signal with the sinusoidal curve

We enter a formula in column D to get the product of the two curves:

Enter the following values in the spreadsheet:

'Product' in cell D2

'=C3*B3' in cell D3

Copy the formula in D3 to the range D4 to D258

(iv) Superimpose on the graph plotted in (ii) a graph of the product.

3. Get the area under the product curve

The area under the curve is an estimation of the contribution of oscillations at this frequency in the signal – this area is also called the magnitude M . The integral of the product curve is the area underneath it, and it can be approximated by summing the values of the entire series in column D;

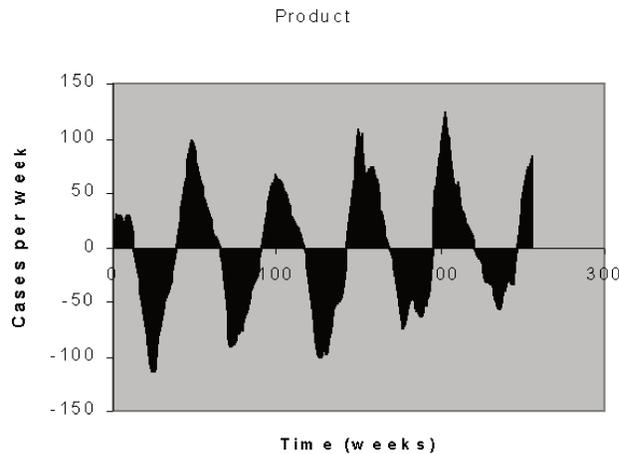


Figure 3. A Graph showing the Product together with the area under the product shaded black.

The black area is the area under the product curve. Since the cosine curve oscillates between -1 and $+1$, the product curve also oscillates.

Enter the following values in the spreadsheet:

‘Area’ in cell F6

‘=SUM(D3:D258)’ in cell G6

A value of -512.9 should be returned for the area

3. Adjust the phase to maximise the area

We arbitrarily started the sinusoidal curve at the origin. This step involves moving the curve along the time axis in order to maximise the area under the product curve. When the area is maximum the two signals are “in phase.” This can be done by trial or error, or by using the Excel solver.

The Microsoft Excel Solver:

Use Solver to determine the maximum or minimum value of one cell by changing other cells. For example, the maximum profit you can generate by changing advertising expenditures. The cells you select must be related through formulas on the worksheet. If not related, changing one cell will not change the other.

To maximise the area we need to introduce into the formulas a new parameter for displacing the sinusoidal curve, the lag, expressed in weeks.

Enter the following values in the spreadsheet:
 'Lag' in cell F3
 '0' in cell G3
Modify the formula in cell C3
 '= $\text{COS}(2*\text{PI}()*(\$A3-\$G\$3)/\$G\$4)$ ' in cell C3
Copy the formula in C3 to the range C4 to C258

Since the lag is 0, the value of the area was not modified.

To maximize the area manually, increase gradually (remember 1 unit is 1 week) the value in cell G3 until you get the largest possible value in cell G4.

However we can use the solver to let Excel get the optimum value for the lag to maximise the area.

Call the 'solver' in the TOOL menu
Enter \$G\$6 for 'Set the target cell'
Set 'Equal to' to Max
Enter '\$G\$3' in 'By changing cells'
Click on 'Solve' button
Click 'OK' to keep solver solution

Excel will return the value for the area as 3703.9. This area is the magnitude of the Fourier transform given in the Appendix.

Lets change the period to 26 weeks to find out the Fourier coefficient at this frequency.

Reset the lag to '0' in cell G3
Set the period to '26' in cell G4

This yields a frequency of 9.8 (approximately 2 cycles per year for the 10 years of data) and an area of -1691.44 . We need to maximise the area by varying the lag using the solver.

Call the 'solver' in the TOOL menu
Enter $G6$ for 'Set the target cell'
Set 'Equal to' to Max
Enter ' $G3$ ' in 'By changing cells'
Click on 'Solve' button
Click 'OK' to keep solver solution

(v) Report the area and lag for the 26 week contribution. Discuss the differences between the 26 and 52 week contributions.

Summary

Here we have calculated the Fourier coefficient showing the magnitude of the contribution of a given frequency (e.g. 26 and 52 weeks) in our data set. This calculation is straightforward but would become rather cumbersome if we had to repeat it 128 times (since we have 128 frequencies for 256 data points). In the next part we will use excel to do all the calculations at once.

Part 2: Computation of all Fourier coefficients simultaneously using the Excel Fast Fourier Transform (FFT) add-in macro.

Computation

Load the file rawcrypto.xls into Excel
Activate Sheet 2 of the worksheet

The analysis add-in macro should be loaded in order to use the FFT.

On the Tools menu select 'Data Analysis' then select 'Fourier Analysis'

The Fourier transform dialog takes only 2 parameters: the input and output range:

Enter '\$B\$3:\$B\$258' in 'Input range'
'\$C\$3' in 'Output range'
Click on OK

The output lists the coefficients expressed as complex numbers, starting at the cell indicated for output range. The first coefficient (cell C3) does not have an imaginary component. It corresponds to the sum of the data over the entire range of values. The next coefficient (cell C4) corresponds to 1 oscillation over the 256 data points (Period of 256 weeks). The next one (cell C5) corresponds to 2 oscillations (Period of 128 weeks). There are 256 coefficients, but the last 128 coefficients are mirror images of the first 128. Hence we will just consider the first 128.

Building the periodogram

The information that we want to get is for which period in weeks (or which frequency) do we get the strongest oscillations in the signal. The periodogram is a graph of the Magnitude of the Fourier coefficient (M) against the period (T) of the oscillations. In order to get the period and M we need to enter a couple of additional values and formulas.

Enter:

'Period' in D2

'Magnitude' in E2

'F' in F2

'1' in cell F4

'=F4+1' in cell F5

Copy formula down to cell F131 (Cell F131 should have value 128)

'=256/F4' in cell D4

The magnitude is the sum of the square of the imaginary and real components of the complex number.

Fourier Complex representation: $A + Bi$

Magnitude is: $M = \sqrt{A^2 + B^2}$

Excel provides a function IMABS() which extracts the magnitude M directly.

Enter '=IMABS(C4)' in cell E4

Copy the formula in the range E4:E131

Note a period of 51.2 weeks in D8 is the closest to a year. It is not exactly 52 because the Fourier Transform uses fractions of 256. This explains the discrepancy but does not cause problems in interpreting the periodogram.

(vi) Compare the magnitude M at 51.2 weeks with the value we got for M (the product area) in the previous section at 52 weeks.

(vii) Plot the periodogram (Magnitude on vertical axis and Period on horizontal axes)

Report what the periodogram tells us about the relative importance of each of the sinusoidal components.

Summary

Here, we have used Excel to perform a spectral analysis of our signal. We have built the periodogram and shown which sinusoids are important.

Part 3: Applications of the Fourier technique in disease surveillance

In this part we will

- (1) use the important oscillations in the Fourier series to model the *Cryptosporidium* disease data.
- (2) Produce confidence intervals on the data
- (3) Identify epidemic increases or decreases in the data
- (4) Use the Fourier model to predict what the incidence of the disease will be in the following year.

Load the file rawcrypto.xls into Excel
Activate Sheet 3 of the worksheet

1. Use the important oscillations in the Fourier series to model the *Cryptosporidium* disease data.

At this point we need to introduce cyclical contributions identified on the periodogram in part 2. From the periodogram, we can decide to introduce 4 cyclical terms, the 52, 26, 17.3 and 13 week cyclical variations. Each are defined by their amplitude and lag.

To get the best model fit to the data we minimise the sum of squares of the difference between the signal (raw data) and the model. The regression coefficient R^2 gives the

proportion of the overall variance (variation in the data) accounted for by the model. This is given in Excel by squaring the CORREL() function and multiplying by 100 to get the value in %.

Enter 'Harmonic1' in C2, 'Harmonic2' in D2, 'Harmonic3' in E2, 'Harmonic4' in F2

'Model' in G2

'Diff^2' in H2

'Parameters' in K2

'a0' in K3

'R^2' in K5

'SS' in K6

'Amp1' in M3

'Lag1' in M4

'Period1' in M5

'Amp2' in M6

'Lag2' in M7

'Period 2' in M8

'Amp3' in M9

'Lag3' in M10

'Period 3' in M11

'Amp4' in M12

'Lag4' in M13

'Period4' in M14

Set cells L3, N3, N4, N6, N7, N9, N10, N12, N13 equal to '0'

Set Cell N5 equal to '52'

Set Cell N8 equal to '26'

Set Cell N11 equal to '17.3'

Set Cell N14 equal to '13'

Set cell C3 equal to '= \$N\$3*COS(2*PI()*((A3-\$N\$4)/\$N\$5))' copy formula to cell C258

Set cell D3 equal to '= \$N\$6*COS(2*PI()*((A3-\$N\$7)/\$N\$8))' copy formula to cell D258

Set cell E3 equal to '= \$N\$9*COS(2*PI()*((A3-\$N\$10)/\$N\$11))' copy formula to cell E258

Set cell F3 equal to '= \$N\$12*COS(2*PI()*((A3-\$N\$13)/\$N\$14))' copy formula to cell F258

We call the solver to optimise the parameters to get the best fit to the model.

Call the 'Solver' in the Tool menu
Enter \$L\$6 for 'Set target cell'
Set 'Equal to 'Min'
Enter 'L3,N3,N4,N6,N7,N9,N10,N12,N13' in 'by changing cell'
Click on 'Solve' button
Click 'OK' to keep solver solution

(viii) Look at the R-squared value and note the proportion of variance that is explained by the model. Comment on this value.

(ix) Plot a graph of time on the horizontal axis and the 4 harmonics together with the model on the vertical axis. Satisfy yourself that the four harmonics added together plus the constant yields the model. Comment on the relative amplitudes of the 4 harmonics.

Setting up 95% Confidence Intervals

We can set up confidence intervals to identify epidemic increases and decreases in the raw data. The 95% confidence intervals are approximately the mean model value at a particular time $\pm 1.96 * ((\text{sum of squares}) / (\text{number of observations}))^{0.5}$.

Enter '95% CI' in I2 and J2
Set I3 '=G3+1.96*(\$L\$6/256)^0.5'
Copy formula down to I258

Set J3 '=G3-1.96*(\$L\$6/256)^0.5'
Copy formula down to J258

(x) Plot a graph showing the raw data together with the model and the confidence intervals.

(xi) Report on any epidemic increases or decreases that you find

(xii) Finally generate data from the Fourier model to predict infection rates in the following year (2002). Plot this on a graph.

Appendix: The Fourier Series and Transform

This section gives a brief mathematical description of the Fourier Series and the Fourier Transform.

Fourier Series

The Fourier series representation of a function can be represented as a sum of cosines

$$y = R_0 + \sum_{n=1}^{\infty} R_n \cos(\omega_n t - \phi_n)$$

where R_0 is an offset (the mean value of y) and $\omega_2 = 2\omega_1$ and $\omega_3 = 3\omega_1$ etc. R_n is the amplitude and ϕ is the lag.

Or alternatively the Fourier series can be represented as a sum of sines and cosines

$$y = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos \omega_n t + b_n \sin \omega_n t)$$

where $a_n = R_n \cos \phi_n$ and $b_n = R_n \sin \phi_n$.

If the period of the fundamental (1st harmonic) of the Fourier series is T , then the a_n and b_n can be found by integration:

$$a_n = \frac{2}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} y \cos \omega_n t dt \quad \text{and} \quad b_n = \frac{2}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} y \sin \omega_n t dt$$

Fourier Transform

A reminder of the exponential form of complex notation is needed:

$$e^{i\theta} = \cos \theta + i \sin \theta \quad \text{and} \quad e^{-i\theta} = \cos \theta - i \sin \theta$$

Let the Fourier transform of a periodic function $f(t)$ be denoted by $F(\omega)$. Then

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t)e^{-i\omega t} dt$$

The transform is, in general, a complex quantity. The exponential term can be written in terms of cosines and sines to give

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t)(\cos \omega t - i \sin \omega t)dt = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \cos \omega t dt - i \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \sin \omega t dt$$

The transform is thus the sum of a real term: the first integral; and the imaginary term: the second integral. If we simplify this equation by writing

$$A(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \cos \omega t dt \quad \text{and} \quad B(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \sin \omega t dt$$

then

$$F(\omega) = A(\omega) - iB(\omega)$$

The magnitude (M) of $F(\omega)$ is given by

$$M = |F(\omega)| = \sqrt{A^2(\omega) + B^2(\omega)}$$

and the phase $\phi(\omega)$ is

$$\phi(\omega) = \tan^{-1} \left(\frac{B(\omega)}{A(\omega)} \right).$$