MAURÍCIO DOMPIERI

ANÁLISE DE COMPLEXIDADE APLICADA À ANTECIPAÇÃO DE CRISES NO MERCADO DE BENS MINERAIS

Área de concentração:
Engenharia Mineral

Orientador:
Prof. Dr. José Renato B. de Lima

São Paulo
2014

MAURÍCIO DOMPIERI

ANÁLISE DE COMPLEXIDADE APLICADA À ANTECIPAÇÃO DE CRISES NO MERCADO DE BENS MINERAIS

Tese apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Doutor em Engenharia.

Área de concentração:
Engenharia Mineral

Orientador:
Prof. Dr. José Renato B. de Lima

São Paulo
2014

Este exemplar foi revisado e alterado em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com anuência de seu orientador.

São Paulo, 16 de dezembro de 2014.

Catalogação-na-publicação

Dompieri, Maurício
Análise de complexidade aplicada à antecipação de crises no mercado de bens minerais / M. Dompieri. -- São Paulo, 2014.
160 p.

Tese (Doutorado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo.

1.Economia mineral 2.Níquel 3.Complexidade (Análise) I. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo II.t.

Ao Prof. Arthur Pinto Chaves.

AGRADECIMENTOS

A conclusão desta tese se deve ao apoio, à presença e intervenção de vários amigos e colaboradores, a quem sinceramente agradeço, citados a seguir:

Prof. Arthur Pinto Chaves, orientador na primeira fase do programa, mestre reverenciado e estimado amigo, cuja enorme sabedoria só é superada por sua generosidade.

Prof. José Renato Barbosa de Lima, amigo querido desde os tempos de escola, sempre disponível, interessado e paciente, foi o maior responsável pela materialização desta tese.

Prof. Giorgio de Tomi, responsável pela volta desta ovelha desgarrada ao seio da Engenharia de Minas e grande entusiasta da análise de complexidade.

Prof. Roy Martelanc, pela disponibilidade, interesse e contribuições por ocasião da qualificação.

Prof.ª Carina Ulsen, pelo interesse, amizade e apoio na formatação final da tese.

Prof. Henrique Kahn pela cortesia e interesse no apoio às formalidades protocolares que foram essenciais à conclusão desta tese.

Prof.ª Ana Carolina Chieregati, pelo apoio e amizade na primeira fase do programa.

Dr.ª Maria Cristina Martinez Bonesio, pela cordialidade e boa vontade e providencial suporte na revisão das referências bibliográficas.

Maristela Martins, pelo incentivo, prestatividade e informações sempre acuradas.

Jacopo Seccatore, parceiro de várias publicações e amigo, pelas discussões e eterno bom humor.

Dr. Jacek Marczyk, por ter me apresentado a análise de complexidade e, com ela, uma nova visão de sistemas complexos, e também pelas muitas horas dispendidas em animadas discussões, teóricas ou não. Agradeço também a disponibilização do software OntoSpace por sua empresa Ontonix Complexity Management LLC de Como, Itália.

Pena, pela disponibilidade e amizade.

Meus pais, por terem me propiciado todas as condições para que eu pudesse concluir esta tese.

Meus filhos e esposa, pela compreensão em relação às incontáveis horas de ausência do convívio familiar.

Penso que o próximo século será o século da complexidade.

(Stephen Hawking em 2000)

RESUMO

O objetivo deste estudo foi o de investigar as oportunidades de aplicação da análise de complexidade como método de análise da Economia Mineral de um bem mineral, utilizando o níquel como estudo de caso. Para tanto foram estudadas as particularidades do mercado de *commodities*, com maior profundidade no caso do níquel, os fatores que nele influem e alguns modelos desenvolvidos para simulação, compreensão e predição do comportamento do sistema composto por este mercado. Foram verificadas as condições para que o mercado de bens minerais tenha sido considerado um sistema complexo. No caso do níquel foi também analisado o estado atual da tecnologia de extração, incluindo os desenvolvimentos mais recentes. Passou-se então à descrição do método utilizado na análise de complexidade que define a complexidade de um sistema como uma grandeza quantificável em função de sua topologia, representada pela estrutura das correlações entre suas variáveis, e da entropia total do sistema. A entropia total do sistema é a integração das entropias de Shannon das variáveis que participam de sua estrutura e é uma medida da sua incerteza. Neste método, o cálculo das correlações entre as variáveis não é feito estatisticamente, mas sim por meio do cálculo da entropia mútua. A vantagem deste método é que revela correlações entre pares de variáveis que apresentam relações não lineares ou até mesmo bifurcações, *clustering* e outras patologias de difícil tratamento estatístico. Desta forma, evita-se o termo correlação, que remete ao tratamento estatístico, preferindo-se acoplamento em seu lugar, para identificar a dependência entre duas variáveis. A seguir, foram abordadas as duas modalidades de análise de complexidade utilizadas: estática e dinâmica. A análise estática revela, por meio de um mapa cognitivo, a estrutura do sistema e as forças de acoplamento entre seus componentes, bem como os índices de complexidade, compostos das complexidades crítica, operacional e mínima, da entropia e da robustez. O índice de maior destaque é o da robustez, que mede a resiliência do sistema por meio da diferença entre as complexidades crítica e operacional, e é um indicador de sua sustentabilidade. A análise dinâmica revela, para sistemas que variam com o tempo, a evolução dos indicadores de complexidade ao longo do tempo. O interesse nesse tipo de análise é que o criador do método identificou experimentalmente que o colapso de um sistema é quase sempre precedido de um aumento brusco em sua complexidade. Esta característica

é então explorada na análise do mercado do níquel para procurar antecipar crises. Na parte experimental pode-se então revelar a estrutura de acoplamentos de uma cesta de metais e do mercado específico do níquel, usando-se a análise estática. A seguir, passou-se a investigar a evolução dos indicadores de complexidade ao longo do tempo, tendo sido possível identificar as situações de crise no mercado pelo aumento de complexidade e entropia e, no caso específico da crise de 2008-2009 foi possível perceber o aumento significativo da complexidade e entropia antes mesmo da instalação da crise, fornecendo assim um aviso prévio do evento.

ABSTRACT

This study aimed at investigating the opportunities for application of complexity analysis as a method of analysis of mineral commodities economics, using nickel as case study. With that intention, the particularities of commodities were studied, in a deeper fashion in the case of nickel, its influencing factors and respective models which have been developed for simulating, understanding and predicting the behavior of the commodity market system. The conditions which allow the mineral commodities market to be considered a complex system have been verified. In the case of nickel the current state of the extraction technology including the latest developments has also been analyzed. Then focus goes to the description of the method used in complexity analysis, where complexity of a system is defined as a measurable quantity based on its topology, represented by the structure of the correlation between its variables, and the total entropy of the system. The total entropy of the system is the integration of the Shannon entropy of the variables that participate in its structure and is a measure of the system's uncertainty, i.e., its departure from a deterministic operating fashion. Calculation of correlations between variables in this method is not done statistically, but by calculating the mutual entropy between each pair of variables. The advantage of this method is that it reveals correlations between pairs of variables that exhibit nonlinear relationships or even bifurcations, clustering and other pathologies of difficult statistical treatment. Thus, the term correlation is avoided, which refers to the statistical treatment, being coupling the preferred expression to identify the dependence between two variables. The two types of complexity analysis were then performed: static and dynamic. Static analysis reveals the system structure and strength of couplings between the components by means of a cognitive map, as well as the complexity indices consisting of critical complexity, operational and minimum entropy and robustness. Robustness is the most interesting index in this case, as it measures the resilience of the system using the difference between the critical and operative complexities, and is an indicator of its sustainability. The dynamic analysis reveals, for time variant systems, the evolution of complexity indicators over time. Interest in this type of analysis is that the method's developer has experimentally identified that the collapse of a system is almost always preceded by a sharp increase in their complexity. This feature is then exploited in the analysis of the nickel market in trying to anticipate

crises. Then, in the experimental section, structures of couplings were identified for a basket of metals and for the specific nickel market, using static analysis. Finally the evolution of indicators of complexity over time has been investigated, which revealed to be possible to identify a crisis in the market by the increasing complexity and entropy and, in the particular case of the 2008-2009 crisis it's been also was possible to observe a significant increase in complexity and entropy just before installation of the crisis itself, providing a pre-alarm of the event.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 16

1.1 INOVAÇÃO DA PESQUISA 18

2 OBJETIVO E RELEVÂNCIA 19

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 20

3.1 COMPLEXIDADE 20

3.1.1 Complexidade x Determinismo 22

3.1.2 Sistemas Complexos 23

3.1.3 Abordagens utilizadas no estudo de sistemas complexos 25

3.2 A ECONOMIA MINERAL DO NÍQUEL 31

3.2.1 Descoberta 31

3.2.2 Primeiras aplicações 31

3.2.3 Aplicações atuais 32

3.2.4 Ocorrência 36

3.2.5 Evolução do mercado internacional do níquel 37

3.2.6 Análise dos fatores que influenciam os preços e sua volatilidade 47

3.2.7 Modelagem 64

3.3 EVOLUÇÃO DA TECNOLOGIA DE EXTRAÇÃO METALÚRGICA DO NÍQUEL 75

3.3.1 Situação atual 75

3.3.2 Novas tecnologias 80

3.4 AVALIAÇÃO DA VIABILIDADE ECONÔMICA DO EMPREENDIMENTO MINERAL 89

3.4.1 Riscos e Incertezas 89

3.4.2 Investimentos 90

4 MATERIAIS E MÉTODOS 95

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO 107

6 CONCLUSÃO 133

7 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS 135

APÊNDICE 1 - DISTRIBUIÇÕES DE PROBABILIDADES - 6 METAIS 145

ANEXO 1 - PREÇOS E VOLUMES DE *COMMODITIES* MINERAIS, DE 1950 A 2010. 146

ANEXO 2 - VARIAÇÃO DE PREÇOS DE 21 *COMMODITIES* X VARIAÇÃO DO PREÇO MÉDIO, DE 1900 A 2007. 150

ANEXO 3 - ANÁLISE DA CRISE IMOBILIÁRIA NORTE AMERICANA DE 2007 155

ANEXO 4 - AVALIAÇÃO DE ESTABILIDADE DE PACIENTES EM UTI 157

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Evolução recente dos avanços no estudo da complexidade 21
Figura 2 - Planilha de Alimentação, Mapa do Sistema e "*Scatter Plots*" 28
Figura 3 - Complexidade, Complexidade Crítica e Robustez 29
Figura 4 - Evolução da Complexidade, Entropia e Robustez do Banco Lehman Brothers 30
Figura 5 - Variação das quantidades de elementos contidos em baterias recarregáveis nos Estados Unidos, de 1996 a 2005 33
Figura 6 - Consumo global de níquel por aplicação 34
Figura 7 - Aços inoxidáveis austeníticos, com níquel em sua composição 35
Figura 8 - Evolução da produção e dos preços do níquel em dólares históricos e constantes de 1998, desde 1900 a 2009 47
Figura 9 - Situação hipotética de oferta-demanda para o níquel (adaptado de Truett e Truett, 1982) 51
Figura 10 - Evolução de preços e estoques LME para o níquel, de 2005 a 2010 51
Figura 11 - Evolução da Atividade Mineira de Ni x Preço - 1995/2004 53
Figura 12 - Crescimento do mercado secundário de *commodities* metálicas 55
Figura 13 - Preços do níquel x preços de sucata austenítica 56
Figura 14 - Intensidade de uso de *commodities* - ciclos econômicos 58
Figura 15 - Índice de preços composto pelo USGS para cinco *commodities* metálicas (cobre, ouro, minério de ferro, chumbo e zinco) e sete minerais industriais (cimento, argila, brita, cal, rocha fosfática, sal, areia e cascalho) em USD de 1997 59
Figura 16 - Escassez de curto prazo - cobalto 60
Figura 17 - Queda acentuada do preço do níquel de fev/2011 a jul/2013 61
Figura 18 - Redução do crescimento da produção de aço inoxidável 61
Figura 19 - Fontes de níquel para produção de aço inoxidável na China 62
Figura 20 - Excesso de níquel no mercado e seu preço na LME 62
Figura 21 - Evolução da participação dos processos na produção de NPI 63
Figura 22 - Comparação dos custos dos processos NPI e preço do níquel na LME 64
Figura 23 - Variações de preço (log) de 21 *commodities*, de 1900 a 2007 69
Figura 24 - Risco global por *commodity* em função do regime de câmbio 70
Figura 25 - Relação entre preços e volumes para 16 *commodities* minerais 71
Figura 26 - Comportamento cíclico dos preços de metais não ferrosos com o níquel destacado no gráfico inferior 73
Figura 27 - Valores previstos pelos modelos x valores reais - 1 período 74
Figura 28 - Valores previstos pelos modelos x valores reais - 6 períodos 75
Figura 29 - Diagrama de fases SiO_2-MgO-FeO 78
Figura 30 - Fluxograma do processo EPAL (PAL +AL) instalado em Ravensthorpe 81
Figura 31- Fluxograma do processo AL autossuficiente em Weda Bay, Indonésia 82
Figura 32 - Fluxograma do processo HL instalado na mina de Caldag, Turquia 83
Figura 33 - Fluxograma do processo de lixiviação com HCl da Neomet, Canadá 84
Figura 34 - Fluxograma do processo DNi da Direct Nickel, Austrália 85
Figura 35 - Gráficos de dispersão e respectivas entropias mútuas 98
Figura 36 – Apresentação tradicional de mapa cognitivo *fuzzy* 99
Figura 37 - Apresentação de mapa cognitivo *fuzzy* pelo software utilizado 99
Figura 38 - Dois atratores e respectivos mapas em um *fitness landscape* 100
Figura 39 - Exemplo de um mapa de sistema (esquerda) e dois dos modos que o compõem, um dominante (centro) e um residual (direita) 101
Figura 40 - Mapa de entropias e gráficos de dispersão de baixa e alta estrutura 103
Figura 41 - Mapa de entropias e gráficos de dispersão de baixa e alta estrutura 104
Figura 42 - Análise dinâmica para séries temporais - passos e largura da janela 105
Figura 43 - Análise dinâmica - Evolução temporal da complexidade (a-esquerda), da entropia (b-centro) e da robustez estrutural (c-direita) 105
Figura 44 - Evolução dos preços nominais de seis metais - escala linear 108
Figura 45 - Evolução dos preços nominais de 6 metais - escala logarítmica 108
Figura 46 - Mapa de sistema para os preços nominais dos 6 metais 109

Figura 47 - Exemplos de *scatter plots* de maior e menor força de acoplamento para o sistema de preços nominais dos 6 metais 109
Figura 48 - *Scatter plots* da Figura 47 plotados em escala logarítmica 110
Figura 49 - Evolução dos preços em USD 1998 de 6 metais - escala linear 110
Figura 50 - Evolução dos preços em USD 1998 de 6 metais - escala logarítmica 111
Figura 51 - Mapa de sistema para os preços em USD 1998 dos 6 metais 112
Figura 52 - Exemplos de *scatter plots* de menor (a-esquerda) e maior (b-direita) força de acoplamento para o sistema de preços em USD 1998 dos seis metais 113
Figura 53 - *Scatter plots* da Figura 52 plotados em escala logarítmica (a-esquerda, b-direita) 113
Figura 54 - Visualização "quantizada" do scatter plot da Figura 53a 114
Figura 55 - Distribuição de probabilidades do Sn e do Al 116
Figura 56 - Mapas dos sistemas de preços de 6 metais para 3 períodos: 1900-1940 (a-superior), 1941-1970 (b-centro) e 1971-2007(c-inferior) 118
Figura 57 - Curvas de distribuição de probabilidade do alumínio para os três períodos 120
Figura 58 - Evolução da complexidade, entropia e robustez para o sistema de 6 metais 122
Figura 59 - Mapa para o "sistema níquel", no período de 1990 a 2011 124
Figura 60 - Exemplos de scatter plots para as principais conexões do mapa: GDP_GER x GDP_JPN (a-sup.esq.), GDP_USA x GDP_JPN (b-sup.dir.), Ni_STK x GDP_USA (c-inf.esq.) e Ni_WRDPRD x GDP_GER (d-inf.dir.) 126
Figura 61 - Evolução da complexidade (a-esquerda), entropia (b-centro) e robustez (c-direita) para o "sistema níquel" 127
Figura 62 - Evolução da complexidade (a-esquerda), entropia (b-centro) e robustez (c-direita) para o "sistema níquel" sem os PIBs 127
Figura 63 - Evolução da complexidade (a-esquerda), entropia (b-centro) e robustez (c-direita) para o "sistema níquel" sem as variáveis globais 128
Figura 64 - Evolução da complexidade (a-esquerda), entropia (b-centro) e robustez (c-direita) para o "sistema níquel" no período de 1950 a 2011 129
Figura 65 - Preços anuais do Ni, complexidade e robustez, de 1950 a 2011 130
Figura 66 - Mesmos dados da Figura 65 porém com sobreposição de janelas 131
Figura 67 - Complexidade e robustez usando dados mensais do "sistema níquel", de 1950 a 2011, com respectivas médias móveis 132
Figura 68 - Evoluções de preço e variação de volume (log) de Al, Cr, Co e Cu, de 1950 a 2010 146
Figura 69 - Evoluções de preço e variação de volume (log) de Au, Fe (concentrado), Pb e Mg, de 1950 a 2010 147
Figura 70 - Evoluções de preço e variação de volume (log) de Mn, Mo, Ni e Pt, de 1950 a 2010 148
Figura 71 - Evoluções de preço e variação de volume (log) de Ag, S, Sn e Zn, de 1950 a 2010 149
Figura 72 - Variações de preço (log) de Al, B, Cr, Co, Cu e Au *versus* das variações de preço (log) médio das 21 *commodities*, de 1900 a 2007 150
Figura 73 - Variações de preço (log) de Fe (aço), Fe (concentrado), Pb, Mg, Mn e Mo *versus* das variações de preço (log) médio das 21 *commodities*, de 1900 a 2007 151
Figura 74 - Variações de preço (log) de Ni, Pt, Si, Ag, S e Sn *versus* das variações de preço (log) médio das 21 *commodities*, de 1900 a 2007 152
Figura 75 - Variações de preço (log) de W, V e Zn *versus* das variações de preço (log) médio das 21 *commodities*, de 1900 a 2007 153
Figura 76 - Evolução da complexidade (a-esquerda) e da robustez/entropia (b-direita) do mercado imobiliário norte-americano entre 2002 e 2007 155
Figura 77 - Dados vitais dos pacientes exibidos nos monitores da UTI para o período de *stress-test* dos dois pacientes 158
Figura 78 - Indicadores de complexidade para o mesmo período de *stress-test* dos dois pacientes 159
Figura 79 - Comparativo dos indicadores de complexidade entre os períodos pré e pós *stress-test* dos dois pacientes 160

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Custos unitários dos serviços de pesquisa de níquel - valores de 2011 **91**
Tabela 2 - Estimativa de orçamento de exploração para níquel em área de 1.000 Ha - valores de 2011 **91**
Tabela 3 - Exemplo de resultados da análise estatística **102**
Tabela 4 - Comparação dos ajustes à curva gaussiana (robustez) em moeda nominal (SD) e fixa (USD98) por *commodity* **115**
Tabela 5 - Comparação dos ajustes à curva gaussiana (robustez) em moeda nominal (USD) por período **117**
Tabela 6 - Principais conexões por período e respectiva força **119**
Tabela 7 - Comparação da volatilidade (CoV) para os 3 períodos **120**
Tabela 8 - Principais conexões do mapa da Figura 59 **125**
Tabela 9 - Risco global por commodity **154**

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Descrição dos processos para produção de níquel **76**
Quadro 2 - Seleção do processo para produção de níquel conforme classificação do minério laterítico **77**
Quadro 3 - Processos de produção de níquel no Brasil **79**
Quadro 4 - Estimativa de CAPEX para mineração e transformação de níquel - valores de 2009 **93**

1 INTRODUÇÃO

No início do século XX, havia a percepção em diversas áreas da ciência de que todas as descobertas mais importantes já haviam sido feitas. Esta impressão foi posteriormente abalada por descobertas que abriram novas e vastas áreas de conhecimento. Em contraste, somos atingidos no início do século XXI pela enormidade que é aquilo que não se conhece. A complexidade tem posição de destaque nesta área que se ignora. Avanços feitos nas últimas duas décadas do século XX apenas enfatizam o quanto ainda é necessário aprender sobre fenômenos complexos (GREEN; NEWTH, 2002).

O alvorecer do século XXI traz consigo, portanto, uma nova fronteira de desafio científico, qual seja, a compreensão e a gestão da *complexidade*. Não se trata em si de um novo desafio, posto que em sua trajetória histórica, a humanidade se tem defrontado frequentemente com desafios de alta complexidade. Como exemplo, imagine-se a intrincada questão logística, enfrentada pelo Império Romano, do suprimento de seus exércitos espalhados pela Europa, Ásia e África. Acrescente-se a isto as questões políticas, sociais, culturais, físicas, econômicas e todas as dimensões que necessariamente deveriam ser planejadas e controladas pelos seus governantes para manter o Império em sua plena funcionalidade.

Ao longo da história, assim como a civilização romana, muitas outras floresceram por algum tempo até que foram engolfadas e destruídas pela própria complexidade que criaram. O mesmo pode ser dito de empresas, projetos, organizações e sistemas.

No mundo moderno, são construídos sistemas cada vez mais complexos, mais conectados e interdependentes, retroalimentados, otimizados, multifuncionais e integrados. Sejam sistemas de transporte, de comunicação, de suprimentos, de manufatura, políticos ou econômicos, todos estão sujeitos aos efeitos do alto grau de complexidade que apresentam.

A característica principal de sistemas altamente complexos é sua capacidade de surpreender. Como simulações em sistemas de autômatos celulares já demonstraram (WOLFRAM, 2002; BAK, 1996), a partir de poucos componentes com regras funcionais simples, pode-se evoluir espontaneamente para comportamentos

impossíveis de se prever a partir das regras individuais conhecidas. Além disto, a partir de certos níveis de complexidade, o sistema pode mudar seu modo de funcionamento, aparentemente estável, sem qualquer aviso prévio, fenômeno conhecido como mudança de fase, o que pode levar a consequências catastróficas, causando até mesmo sua própria destruição.

Uma característica marcante comum à economia de grande parte dos bens minerais é seu comportamento cíclico. Baixa demanda implica em baixos preços, que por sua vez inviabilizam parte do sistema produtivo. Os produtores operando com lucro marginal veem seu negócio inviabilizado e reduzem ou paralisam a produção, causando então escassez do bem assim que os estoques globais se esgotam. Tem-se então a escalada dos preços do bem e a corrida a novos investimentos para início ou retomada da produção. Devido ao tempo de maturação dos investimentos, no momento do início da produção é possível que a demanda corrente já não seja suficiente para absorvê-la totalmente, causando um excesso de oferta e um novo ciclo de baixa nos preços.

Por outro lado, estando na base da cadeia produtiva, a demanda por bens minerais é controlada por outros setores da economia de forma complexa, acrescentando novas dimensões de análise ao problema.

Pelo lado da produção, há desafios tecnológicos no sentido de viabilizar depósitos com teores cada vez mais baixos ou com dificuldades de processo, como é o caso do níquel de origem laterítica, que constitui a maioria dos novos recursos descobertos nos últimos anos.

Há ainda que se considerar os desafios logísticos, energéticos, políticos e ambientais que afetam a economia e seus reflexos sobre o bem mineral de interesse.

Devido ao aspecto eminentemente complexo da análise, pela sua multidimensionalidade, interconectividade, não linearidade e criticidade, considera-se que o tratamento estatístico convencional das variáveis envolvidas é insuficiente para extrair do sistema todo o potencial de conhecimento ali contido. A análise de complexidade parece ser a ferramenta mais adequada para o desafio, posto que não impõe modelos pré-concebidos aos dados, permitindo assim que toda a complexidade neles contida seja extraída, e fornece, além da extração do

acoplamento[1] entre as variáveis, uma grande gama de outras informações de alta relevância, como será visto no capítulo 4 - MATERIAIS E MÉTODOS.

O níquel tem sido usado possivelmente desde cerca de 3.500 aC, como indica o conteúdo de cerca de 2% de Ni nas ligas de bronze encontradas na região onde hoje se encontra a Síria. Atualmente, é utilizado em vários produtos industriais e de consumo, como o aço inoxidável, revestimentos, imãs, moedas, baterias recarregáveis e ligas especiais. Sua produção em 2009 e 2010 ficou em torno de 1,5 milhões de t/ano, que a preços deste período, cerca de USD22 mil/t, gera cerca de USD33 bilhões anuais. O mercado do níquel, como será visto neste texto, pode ser considerado um sistema complexo e como tal, dar origem a surpresas. A Análise de Complexidade, por meio da análise da estrutura de acoplamento entre as variáveis que controlam um sistema e da entropia associada à troca de informações entre estas variáveis, quantifica a complexidade do sistema e permite antecipar, observando-se a evolução desta entidade, a iminência de estados críticos que geram as surpresas ou mudanças de fase. O níquel foi escolhido como suporte para este estudo por sua importância econômica e pelo histórico do comportamento de seu mercado, com fases bem definidas de crescimento sustentado, estabilidade e volatilidade, o que facilita a correlação com a evolução da complexidade. O objetivo da pesquisa é investigar a aplicabilidade da análise de complexidade como um método que permita antecipar movimentos na economia de um bem mineral, utilizando uma abordagem holística, ferramentas inovadoras e o níquel como estudo de caso.

1.1 INOVAÇÃO DA PESQUISA

A inovação proposta nesta pesquisa é a utilização da análise de complexidade e seus indicadores como aviso prévio para colapsos do mercado de bens minerais. Esta tecnologia já foi utilizada com sucesso na área médica na previsão de estabilidade fisiológica de pacientes e também em outras áreas mas nunca antes em economia mineral.

---

[1] O termo “acoplamento” se refere à dependência entre duas variáveis, não necessariamente identificada por métodos estatísticos, sendo utilizada preferencialmente ao longo deste trabalho em detrimento do termo “correlação”, o qual possui conotação eminentemente estatística.

2 OBJETIVO E RELEVÂNCIA

O objetivo deste trabalho é investigar a aplicabilidade da análise de complexidade como método para a análise da Economia Mineral do níquel, de forma holística, para entender como estão correlacionados seu sistema produtivo e os mercados bem como os principais *players* que direta ou indiretamente exerçam alguma influência no sistema. Métodos e ferramentas de análise de complexidade serão empregados para compreender as inter-relações entre os componentes, medir o grau de complexidade e resiliência do sistema e, a partir disto, procurar identificar sinalizadores que permitam alguma antecipação de seu comportamento futuro.

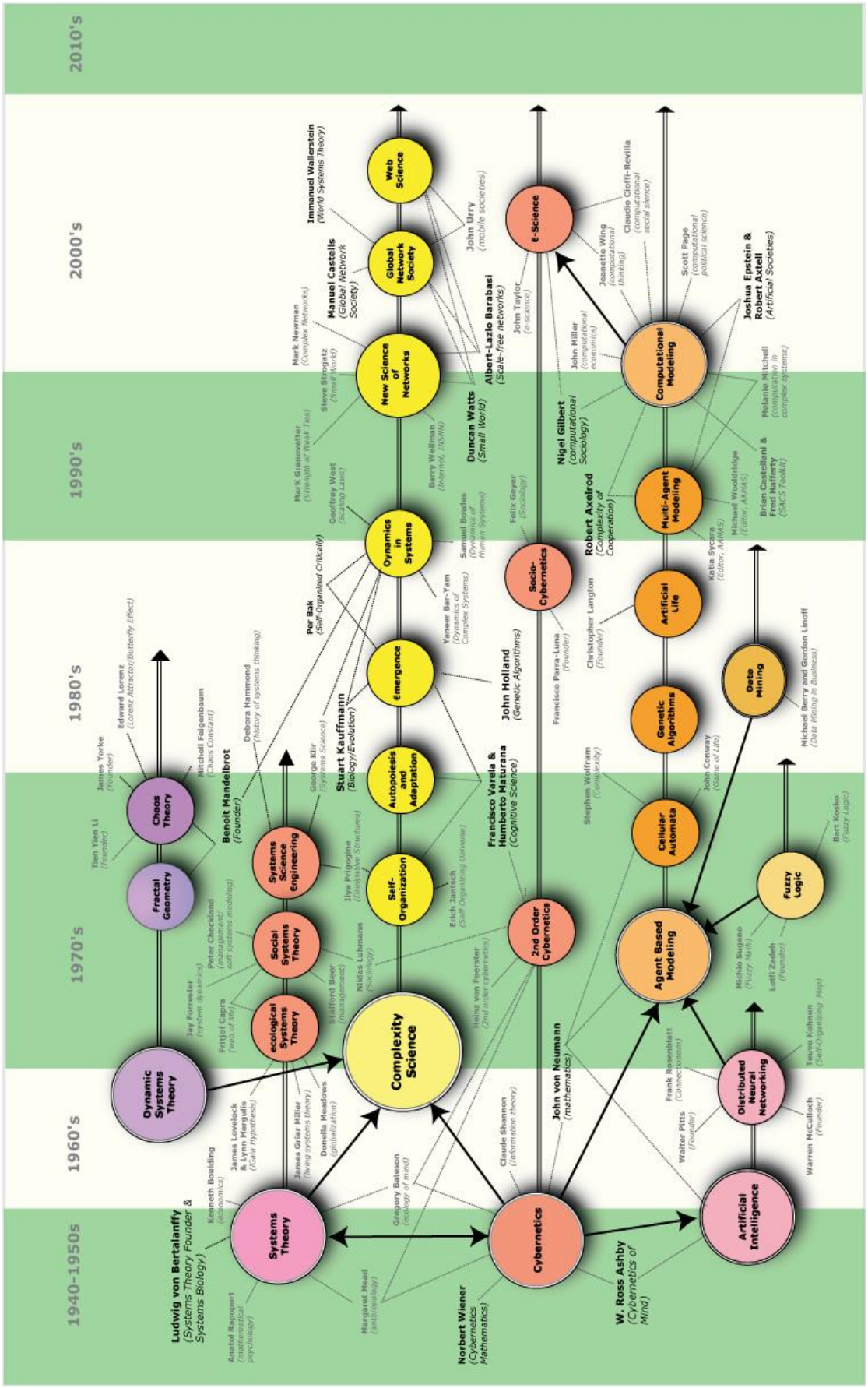
Em última análise, o principal objetivo do presente trabalho é desenvolver um método que permita antecipar movimentos significativos na economia de um bem mineral, utilizando a Análise de Complexidade para compreender de forma holística quais agentes nela influem, e de que forma.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A revisão bibliográfica realizada visou principalmente buscar subsídios à compreensão do que se define como complexidade e sistemas complexos, bem como de qual é o estado da arte no tratamento de sistemas complexos. Por outro lado, buscou-se levantar qual seria um bem mineral adequado a este estudo, tanto por sua relevância econômica quanto pela complexidade de seu sistema econômico.

3.1 COMPLEXIDADE

A Complexidade está emergindo como um paradigma pós-newtoniano para abordar, de um ponto de vista unificador, um grande corpo de fenômenos que ocorrem em sistemas constituídos de várias subunidades, nos pontos de intersecção entre a Física, a Engenharia e as Ciências Biológicas, Ambientais e Humanas. Durante um longo tempo, prevaleceu a ideia de que a percepção destes tipos de sistema como complexos advinha de nossa informação incompleta sobre os mesmos, devido ao grande número de variáveis e parâmetros mascararem o determinismo subjacente. Ao longo dos anos, dados experimentais e avanços teóricos demonstraram o contrário: a Complexidade tem suas raízes nas leis fundamentais da Física. Esta percepção abriu o caminho para o estudo sistemático da complexidade, que se constitui hoje em um dos ramos da ciência que mais rapidamente se desenvolve. Na Figura 1 podem ser vistos os recentes avanços do estudo da Complexidade.



Fonte: http://en.wikipedia.org/wiki/File:Complexity-map-overview.png, em 10/10/2010

Figura 1 - Evolução recente dos avanços no estudo da complexidade

Tradicionalmente, as ciências fundamentais exploram fenômenos em escalas muito pequenas ou muito grandes, fora de nossa percepção cotidiana. A singularidade dos sistemas complexos é que eles se relacionam a uma classe de fenômenos de importância fundamental nos quais o sistema e o observador evoluem em escalas comparáveis de tempo e espaço.

O foco da revisão bibliográfica se concentra em fenômenos advindos da complexidade, como auto-organização, formação de padrões ou emergência e estados críticos. Avançando em direção aos sistemas complexos, o interesse será em como estes conceitos são utilizados na descrição e análise de seu comportamento, estabilidade e fragilidade. Por fim, avalia-se a adequação das ferramentas disponíveis para o tratamento de dados de sistemas complexos, como o que se propõe estudar nesta pesquisa. Complementarmente, buscar-se-á subsídios para demonstrar a adequação da escolha da economia do níquel para esta pesquisa.

3.1.1 Complexidade x Determinismo

No fim do século XIX, Henri Poincaré, motivado por um concurso promovido pelo Rei da Suécia, apresentou uma solução para o problema dos três corpos (p.ex. um planeta com duas luas) originalmente abordado por Newton. Um erro grave, porém, foi descoberto em seu trabalho antes de sua publicação, o que levou Poincaré a concluir que o problema não tinha solução exata. Este resultado negativo é considerado por muitos o nascimento da Ciência da Complexidade. Suas implicações só foram amplamente reconhecidas a partir de 1960, quando estudos numéricos de modelos atmosféricos simplificados demonstraram que sistemas não lineares com apenas três graus de liberdade podem facilmente exibir o fenômeno do caos (a principal observação foi a imprevisibilidade da resposta a condições iniciais, popularmente conhecida como efeito borboleta, devido a uma especulação de Lorenz de que o bater das asas de uma borboleta no Brasil poderia causar um tornado no Texas) (SCOTT, 2005).

A partir de então se percebeu que mesmo no universo macroscópico, vários fenômenos não poderiam ser modelados de forma exata, determinística, a partir de equações matemáticas analíticas (no caso do universo microscópico, esta certeza já se tinha desde cerca de 1920, a partir dos fundamentos da Mecânica Quântica

estabelecidos por Planck, Bohr, Heisenberg e outros). O maior choque para a comunidade científica, porém, veio em 1931 com a publicação do teorema da incompletude sobre a natureza da matemática, de Kurt Gödel (GÖDEL, 1931). O teorema afirma, segundo a interpretação de Stephen Hawking (HAWKING, 2001), que dentro de qualquer sistema formal de axiomas, como a matemática atual, sempre persistem questões que não podem ser provadas nem refutadas com base nos próprios axiomas que definem o sistema, derrubando assim a crença generalizada de que a matemática era um sistema coerente e completo baseado em um único fundamento lógico.

Várias ferramentas não determinísticas vêm sendo desenvolvidas desde então para tratar esta classe de problemas, com aplicações nas mais diversas áreas do conhecimento humano, como Física, Matemática, Engenharia, Geologia, Biologia, Medicina, Ciências Sociais, Economia, apenas para citar algumas.

3.1.2 Sistemas Complexos

Um sistema complexo é constituído de componentes interconectados que em conjunto exibem propriedades ou comportamentos que não são óbvios tendo em vista as propriedades dos componentes individuais (JOSLYN; ROCHA, 2000).

Exemplos de sistemas complexos para os quais se desenvolvem modelos de complexidade incluem colônias de formigas, economia e estruturas sociais humanas, clima, sistemas nervosos, células e organismos vivos, infraestruturas de energia e telecomunicações.

Os sistemas complexos são objeto de estudo de diversas áreas das Ciências Naturais, Matemática e Ciências Sociais, especializando-se os campos de Teoria de Sistemas, Teoria da Complexidade, Ecologia de Sistemas e a Cibernética no estudo interdisciplinar dos sistemas complexos.

Várias definições informais têm sido propostas para o que seja um Sistema Complexo. A seguir enumera-se algumas, extraídas da edição especial sobre sistemas complexos da revista Science (SCIENCE, 1999):

- um sistema complexo é um sistema altamente estruturado que exibe variações em sua estrutura (GOLDENFELD; KADANOFF, 1999);

- um sistema complexo caracteriza-se por sua evolução ser muito sensível às condições iniciais ou a pequenas perturbações, no qual o número de componentes independentes interagindo entre si é grande, ou para o qual haja múltiplas direções para as quais o sistema possa evoluir (WHITESIDES; ISMAGILOV, 1999);
- sistema complexo é aquele que, por concepção, função ou ambos, seja difícil de compreender e analisar (WENG; BHALLA; IYENGAR, 1999);
- sistema complexo é aquele em que existem interações múltiplas entre muitos componentes diferentes. (RIND, 1999); e
- sistemas complexos são aqueles em processo de constante evolução e desdobramento no tempo. (ARTHUR, 1999).

Dentre as três classes de Sistemas Complexos, Caóticos, Não lineares e Adaptativos, este último adiciona à multiplicidade de conexões e elementos a capacidade de mudança e aprendizado a partir da própria experiência. Exemplos de sistemas operando desta forma são o mercado de ações, sistemas sociais, atividades industriais e vários outros. Desta forma, a análise do níquel aqui proposta será feita sob a óptica de um Sistema Complexo Adaptativo.

Hipóteses formuladas por Wolfram (1984), Langton (1992), Kaufmann (1993) e Casti (1994) de que a condição *sine qua non* para se considerar adaptativo um sistema complexo é sua capacidade de produzir inovação ou causar surpresa. Esta é a definição mais genérica encontrada, e que será adotada na presente pesquisa.

Alguns comportamentos presentes nesta classe de sistemas, listadas a seguir, são prontamente identificáveis na análise da economia de um bem mineral, e serão investigados em detalhe:

- seus limites são difusos - Pode ser difícil determinar com precisão as fronteiras de um sistema complexo. A decisão fica por conta do observador;
- sua história pode influir no comportamento presente - Sistemas Complexos são dinâmicos e evoluem ao longo do tempo, assim, estados anteriores podem influenciar estados presentes. Formalmente, podem exibir histerese;

- pode haver recursividade - Os componentes de um sistema complexo podem ser sistemas complexos em si. Como exemplo, uma economia é constituída de organizações, que são constituídas de pessoas, que por sua vez são constituídas de células - todos sistemas complexos;
- pode haver diversas dinâmicas intrasistêmicas - A dinâmica das trocas de informação na rede de conexões de um sistema complexo é tão importante quanto as próprias regras individuais dos componentes. Pode haver, por exemplo, diversas subredes ou subsistemas com intensa troca de informações locais, comunicando-se entre si por uma rede de baixa densidade. Novamente, o exemplo do item anterior se aplica;
- podem produzir fenômenos emergentes - Embora os componentes do sistema se comportem deterministicamente, os resultados do comportamento coletivo só podem ser estudados em outro nível. Entre vários exemplos, pode-se citar o comportamento social de animais, mais especificamente o comportamento de manada;
- as relações não são lineares - Em termos práticos, isto significa que uma pequena perturbação em um sistema pode causar um efeito desproporcional (como no já citado “efeito borboleta”); e
- as relações apresentam realimentação - A realimentação, tanto negativa (amortecimento) quanto positiva (amplificação) está sempre presente nos sistemas complexos. Os efeitos do comportamento de um elemento são realimentados de tal forma que o próprio elemento é alterado.

3.1.3 Abordagens utilizadas no estudo de sistemas complexos

Nem todos os pesquisadores na área de sistemas complexos concordam sobre a melhor maneira de medir a complexidade. Há na literatura da Ciência da Computação vários métodos para medir a complexidade que podem ser aplicados a sistemas complexos. Em Bar-Yam (1997), a complexidade de um sistema é definida como a quantidade de informação necessária para descrevê-lo.

A Complexidade é então relacionada ao número de dígitos binários (bits) necessários para especificar todos os estados particulares que o sistema pode

assumir. Tomando Ω como o número de estados possíveis, então o número necessário de bits de informação é:

$$I=\log2(\Omega)$$

Este é um método muito utilizado em ciências da computação para medir a complexidade de um algoritmo.

Outro conceito importante a abordar é o de caos. O estudo científico e matemático da Teoria do Caos contém muitas sobreposições com o estudo de Sistemas Complexos: a Teoria do Caos pode ser usada para estudar sistemas complexos embora não se restrinja apenas ao estudo destes sistemas. Ela tem sido usada para estudar sistemas complexos (Bar Yam, 1997), porque estes sistemas podem ser geralmente definidos como sistemas determinísticos de difícil previsão. Esta teoria, no entanto, aborda situações, como a turbulência, que rapidamente se tornam altamente desordenadas e incontroláveis. Por outro lado, a complexidade trata de sistemas compostos por muitos agentes que interagem (Axelrod, 1997). Em geral, pode-se afirmar que o estudo de sistemas complexos pode ser abordado pela Teoria do Caos, mesmo que esta não esteja especificamente relacionada com a forma como esses sistemas sejam projetados ou modelados.

Vários outros métodos para modelagem computacional de sistemas complexos têm sido propostos e os mais importantes encontram-se a seguir:

- métodos estatísticos: métodos estatísticos têm sido utilizados em todas as ciências, especialmente nas ciências sociais e biológicas para capturar resultados experimentais no estudo de grandes populações.

- mapas estocásticos iterativos: são sistemas em que o resultado de um ponto de decisão particular é probabilística e não determinística. É uma ferramenta matemática que pode ser utilizada em combinação com modelagem computacional (Bar-Yam, 1997).

- métodos de redes neurais: as redes neurais artificiais também têm sido aplicadas com sucesso na modelagem de Sistemas Complexos. A abordagem conexionista, inspirada pela forma como dados são processados nos sistemas neurais biológicos, é explorada como um modelo para sistemas de agentes que não podem ser facilmente descritos por um conjunto discreto de interações baseadas em regras (Cilliers, 1998).

- modelos matemáticos e analíticos: antes do advento da modelagem computacional, este era o método mais utilizado para modelagem de Sistemas Complexos. Neste método procura-se captar o comportamento do sistema por meio de modelos analíticos que utilizam equações exatas, as quais são então resolvidas utilizando-se técnicas matemáticas (Ghosh, 2000).

- teoria da computação: este método utiliza conceitos conhecidos, como a máquina de Turing, para medir a complexidade de um sistema. Também pode ser utilizada para analisar interações de agentes, as quais podem ser muito complexas (Bar-Yam, 1997).

- termodinâmica e mecânica estatística: trata-se de uma abordagem física para estudar a ação de uma população com muitos agentes, utilizando métodos estatísticos para melhorar os resultados (Bar-Yam, 1997).

- medição da complexidade do sistema: um método proposto por Marczyk (2009) com base em uma definição rigorosa de sistema complexo. Tendo definido uma métrica para a complexidade, esta se torna uma propriedade do sistema, assim como a massa, a pressão, a temperatura ou qualquer outra.

Adota-se neste trabalho o método sugerido em Marczyk (2009) e Lomario et al. (2007), o qual será descrito no capítulo 4 – MATERIAIS E MÉTODOS, utilizando como apoio a ferramenta cedida pela empresa Ontonix LLC, o OntoSpace®, que implementa os respectivos conceito e método e permite obter o cálculo de complexidade do sistema e outras grandezas relacionadas. Trata-se de um aplicativo genérico, que emprega uma abordagem inovadora não vinculada a qualquer tipo de modelo pré-concebido (*model-free*) e utiliza um método patenteado de extração de mapas cognitivos baseado em lógica *fuzzy* (COMPLEX SYSTEMS ENGINEERING INC, 2009). Este aplicativo foi concebido para tratar quaisquer tipos de sistemas que possam ser representados por uma matriz de dados, na qual as linhas são medidas de estados sucessivos (amostras) das variáveis dispostas nas colunas, como exemplificado na Figura 2 (destaque na tabela).

O aplicativo pode analisar dados provenientes de simulações estocásticas usando, por exemplo, o Método de Monte Carlo, ou, se disponíveis, dados reais históricos ou coletados em tempo real (por instrumentação).

As análises possíveis são: Estática, Dinâmica e Tempo-Real (caso particular da Dinâmica).

A Análise Estática permite conhecer as dependências entre os dados e sua força relativa. Os resultados são apresentados em mapas de conectividade do sistema como o do centro da Figura 2.

As variáveis do sistema são dispostas na diagonal do mapa e são conectadas por linhas horizontais e verticais a outras variáveis com quem mantêm dependência. Nos encontros das linhas horizontais e verticais encontram-se os nós, que ao passar do mouse revelam o gráfico da correlação encontrada, como no lado esquerdo da Figura 2. A análise de dependência não utiliza regressão linear ou qualquer outro método que implique em perda de informação. O processo será detalhado no capítulo 4 - Materiais e Métodos.

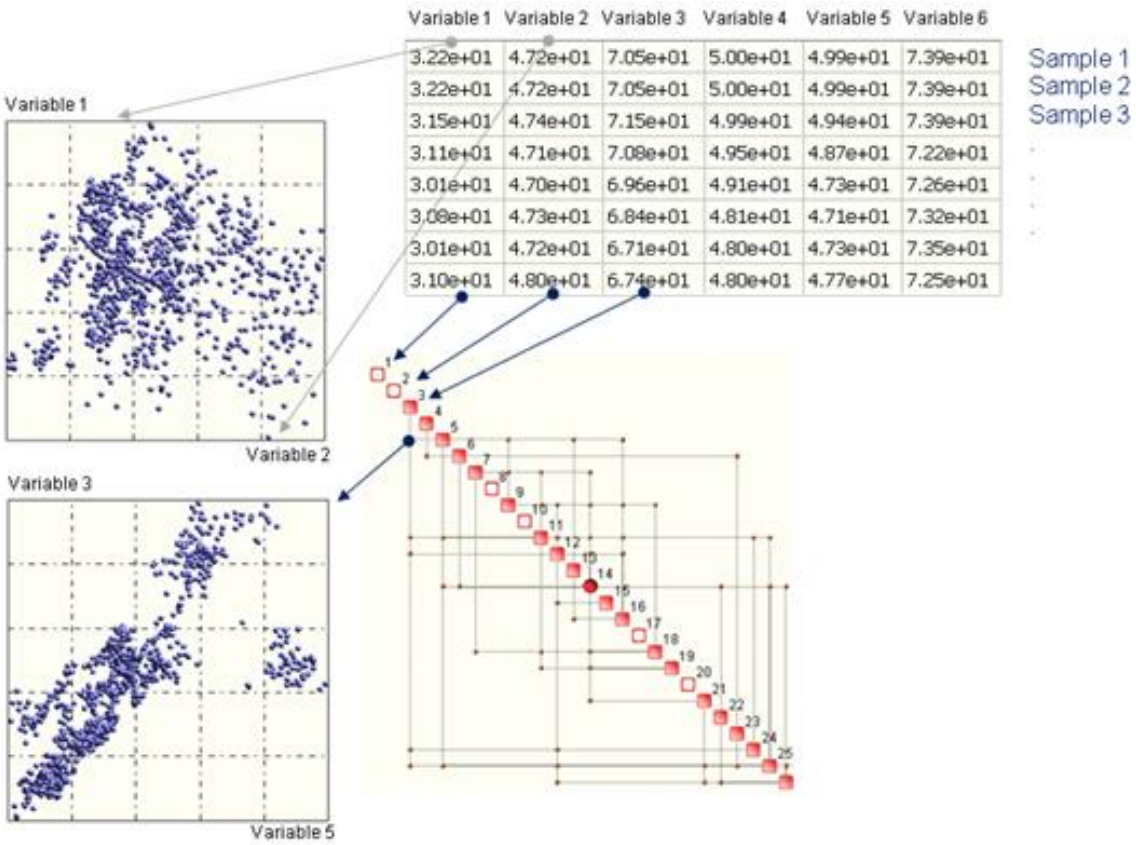


Figura 2 - Planilha de Alimentação, Mapa do Sistema e "*Scatter Plots*"

A análise do mapa permite compreender toda a rede de relacionamentos dentro do sistema. São determinados também seus pontos de apoio (variáveis

"*hub*"), importantes pelo impacto que causam no sistema devido ao alto número de conexões que possuem com suas outras variáveis.

Importante resultado da análise, ilustrado na Figura 3, é a quantificação dos níveis de complexidade operacional e crítico, capacidade não disponível em outros aplicativos. Todo sistema tem um determinado nível de complexidade que é uma propriedade que pode ser calculada, tal como a entropia ou a energia. A complexidade operacional do sistema é calculada com base na topologia do mapa (número de variáveis e conexões) e na entropia (ruído) na transferência de informações entre as variáveis. A complexidade crítica representa, de certa forma, o limite da estrutura subjacente no sistema em manter sua funcionalidade. A diferença entre os níveis de complexidade crítica e operacional é definida como a robustez do sistema. A robustez representa a resiliência do sistema, ou seja, a capacidade de restaurar seu equilíbrio após sofrer uma perturbação significativa.

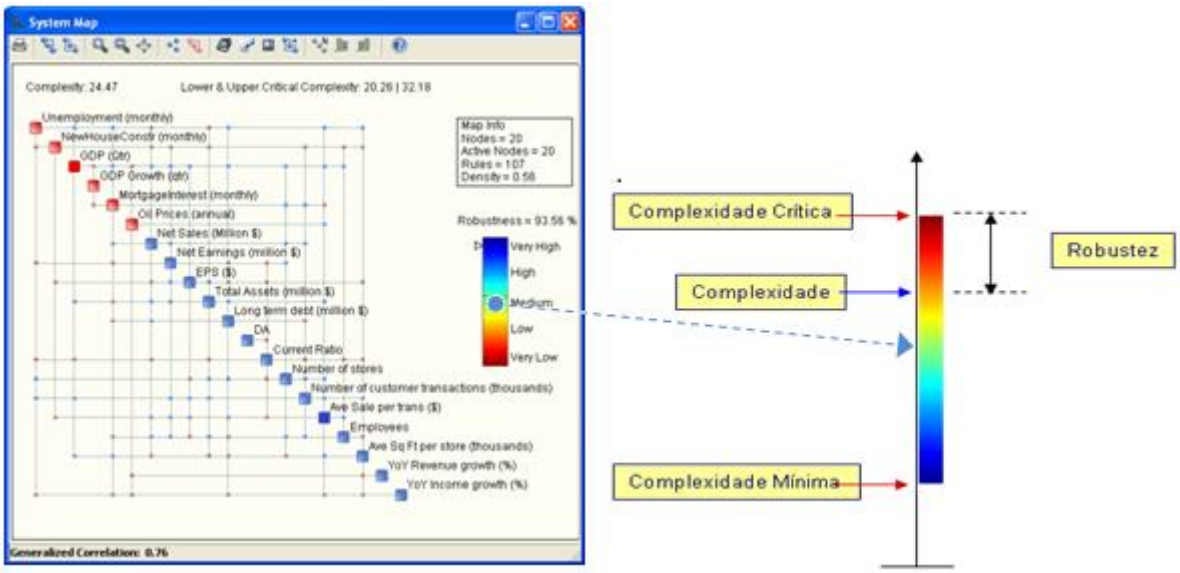


Figura 3 - Complexidade, Complexidade Crítica e Robustez

Sistemas operando em níveis de complexidade operacional muito próximos à da complexidade crítica apresentam comportamentos típicos dos sistemas complexos, podendo causar surpresas como mudanças de fase ou até mesmo ruptura catastrófica.

O aplicativo permite também conhecer quais são as variáveis que mais influem na complexidade do sistema como um todo, as quais devem ser analisadas prioritariamente em um trabalho de redução de complexidade.

É possível também executar simulações, para se compreender como intervenções nas diversas variáveis agem sobre o sistema.

No caso da Análise Dinâmica, é estudada a evolução dos níveis de complexidade, entropia e robustez do sistema ao longo do tempo, como ilustrado na Figura 4. Esta análise permite observar e correlacionar as variações de complexidade com eventos históricos conhecidos ao longo do tempo. Sua importância é que em uma análise *post-mortem* podem-se descobrir padrões de variação da complexidade que ocorrem como avisos prévios de eventos importantes. Este estudo já foi feito (MARCZYK, 2009) no caso da quebra do banco Lehman Brothers, em 2008, objeto da Figura 4, no qual foi possível prever o evento com antecedência de dois anos, como se pode notar pelo aumento brusco de entropia acompanhado imediatamente pela redução da robustez, no fim de 2006. Utilizou-se no estudo apenas dados públicos dos balanços trimestrais dos quatro anos anteriores ao fato.

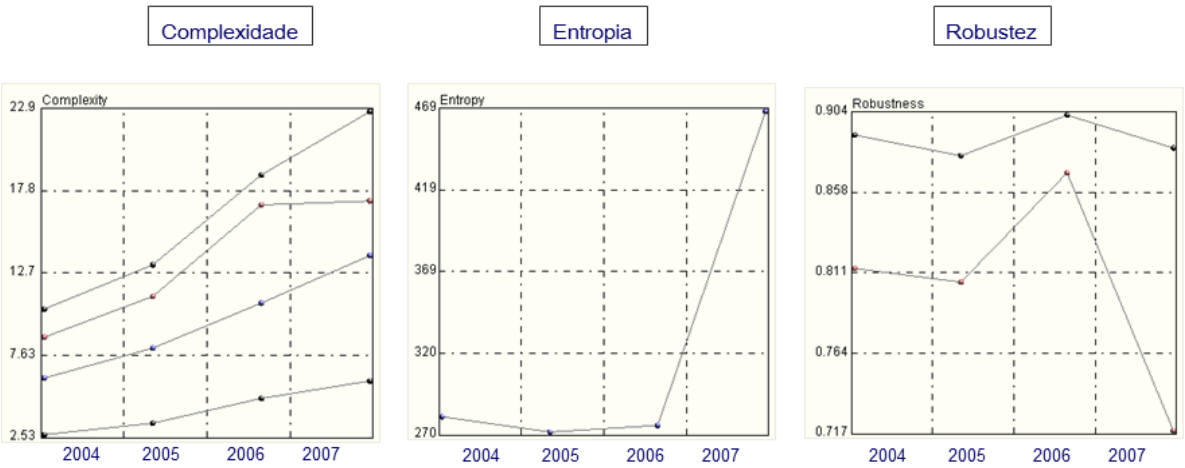


Figura 4 - Evolução da Complexidade, Entropia e Robustez do Banco Lehman Brothers

A análise em tempo real presta-se a monitorar a complexidade de um sistema, seja uma usina, um paciente de UTI ou uma bolsa de valores, emitindo alarmes sempre que alguma variação significativa de complexidade prenuncie uma instabilização importante do sistema. Apesar de já haver aplicações operando, não será utilizado este recurso nesta pesquisa.

Descrevem-se dois estudos, nos anexos 3 e 4, como ilustração da utilização desta técnica para antecipar crises, o primeiro, realizado pela Ontonix (MARCZYK,

2009), analisando-se postumamente os dados da crise imobiliária norte-americana de 2007 e o segundo, pelo autor, comparando dados de dois pacientes da UTI do Hospital Universitário da Universidade de São Paulo.

3.2 A ECONOMIA MINERAL DO NÍQUEL

3.2.1 Descoberta

Em meados do século XVII, na Alemanha, havia dificuldade no processamento de alguns minérios sulfetados de cobre em função de um mineral associado que foi denominado *kupfernickel*, livremente traduzido como ”cobre diabólico”. O mineral problemático acabou sendo identificado como arseneto de níquel, atualmente conhecido como niquelina. Em 1751, Axel Fredrik Cronstedt isolou um elemento químico desconhecido a partir da niquelina ao qual foi posteriormente dado seu nome atual, níquel. As primeiras operações de níquel utilizavam minérios sulfetados em seus processos, principalmente no Canadá, Europa Central, China, Pensilvânia e Escandinávia. A escala de extração do níquel se manteve limitada até que os grandes depósitos de níquel laterítico da Nova Caledônia entraram em produção por volta de 1875 (BOLDT; QUENEAU, 1967).

3.2.2 Primeiras aplicações

O níquel teve pouco significado econômico ou industrial até 1820, quando Michael Faraday conseguiu sintetizar ferro meteórico, adicionando níquel ao ferro puro. A liga de Faraday é a precursora do aço-níquel, uma família de ligas ferrosas que desempenha até hoje um papel importante no desenvolvimento industrial. Um dos primeiros usos do aço-níquel foi na indústria bélica. Após alguns estudos nos Estados Unidos entre 1890-1891 e alguns anos depois a Bethlehem Iron Co. (precursor da Bethlehem Steel Corp) iniciou a produção de armas de grande porte de aço-níquel para os militares dos EUA (WHARTON, 1897). Os aços-níquel desenvolvidos antes da Primeira Guerra Mundial continham apenas 1,5% a 4,5% de níquel, com teor de carbono de 0,2% a 0,5% (HESS, 1917). Outros usos importantes na época foram as estruturas de pontes, trilhos de trem, eixos, eixos de propulsão naval e peças de motores de automóveis (CAMMEN, 1928). A primeira liga de aço-

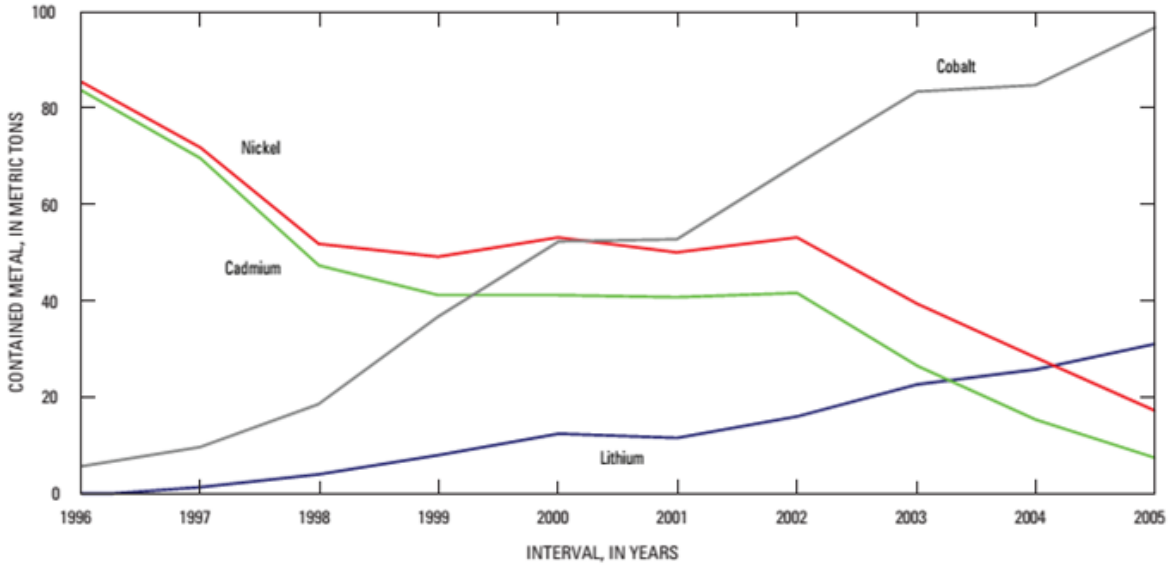
níquel-cromo comercial - um dos primeiros tipos de aço inoxidável - foi feita em St. Etienne, França, em 1891. Assim como o armamento de aço-níquel, o armamento de aço-níquel-cromo demonstrou ser muito superior aos de aço de carbono então utilizados, motivando assim grande produção do novo tipo de aço (HALL, 1954).

3.2.3 Aplicações atuais

Em razão de suas propriedades - alta resistência à corrosão, moderada condutividade elétrica e térmica, elevada resistência e tenacidade a altas temperaturas e de sua capacidade de transferi-las às suas ligas - o níquel é um dos mais importantes metais de adição às ligas, sejam ferrosas ou não ferrosas.

Encontra aplicação em uma extensa gama de produtos nos setores de bens de consumo duráveis, de química e alimentos (em equipamentos), industrial, militar, de transporte, aeroespacial, marítimo e em aplicações arquitetônicas. Aplicado eletroliticamente como fina cobertura ao aço, no processo conhecido como niquelagem, o níquel se faz presente nos utensílios domésticos e em inúmeros outros artigos de uso cotidiano.

Em meados da década de 1990, o níquel era um elemento essencial em baterias portáteis de hidreto metálico de níquel (NiMH), um aperfeiçoamento das baterias de níquel-cádmio (NiCd), ambientalmente problemáticas. Mais de 50% das baterias portáteis eram do tipo NiMH. Com o advento e redução de custo das baterias de íons de lítio na primeira década do milênio, estas passaram a ganhar mercado por sua densidade de carga elevada que significa ao mesmo tempo menor peso e maior tempo de utilização para o usuário. Desta forma, as baterias NiMH passaram a deter menos de 10% do mercado em 2005 e assim têm permanecido até o momento. Pode-se verificar na Figura 5 a evolução do uso do níquel frente a outros elementos usados por outras tecnologias de bateria ao longo do período de transição da tecnologia (WILBURN, 2008).

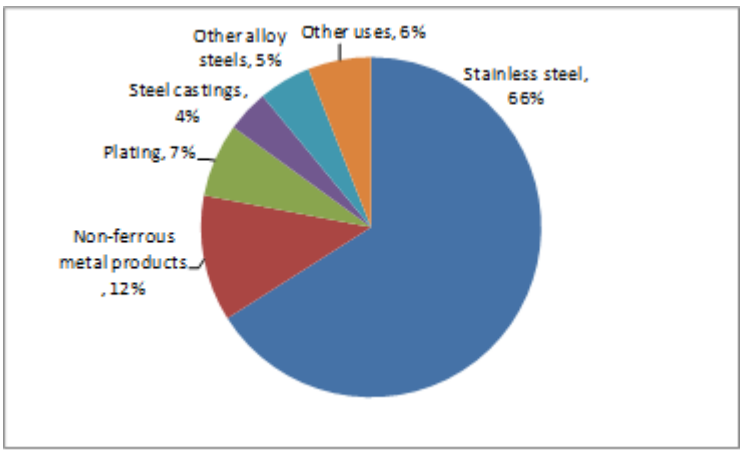


Fonte: WILBURN,2008

Figura 5 - Variação das quantidades de elementos contidos em baterias recarregáveis nos Estados Unidos, de 1996 a 2005

O uso principal do níquel, no entanto, é como elemento de liga com o cromo e outros metais nos aços inoxidáveis, cujos usos se multiplicam na indústria e na construção civil, entre inúmeros setores.

Em 2010, a produção de aço inoxidável foi responsável por mais de 60% do consumo mundial de níquel e foi o principal fator a afetar os preços do níquel. Os 40% restantes são usados na fabricação de ligas ferrosas e não ferrosas, baterias, niquelagem entre outros usos. A Figura 6 mostra a distribuição do consumo global do níquel, em 2006, de acordo com estudos da CRU (consultores independentes).



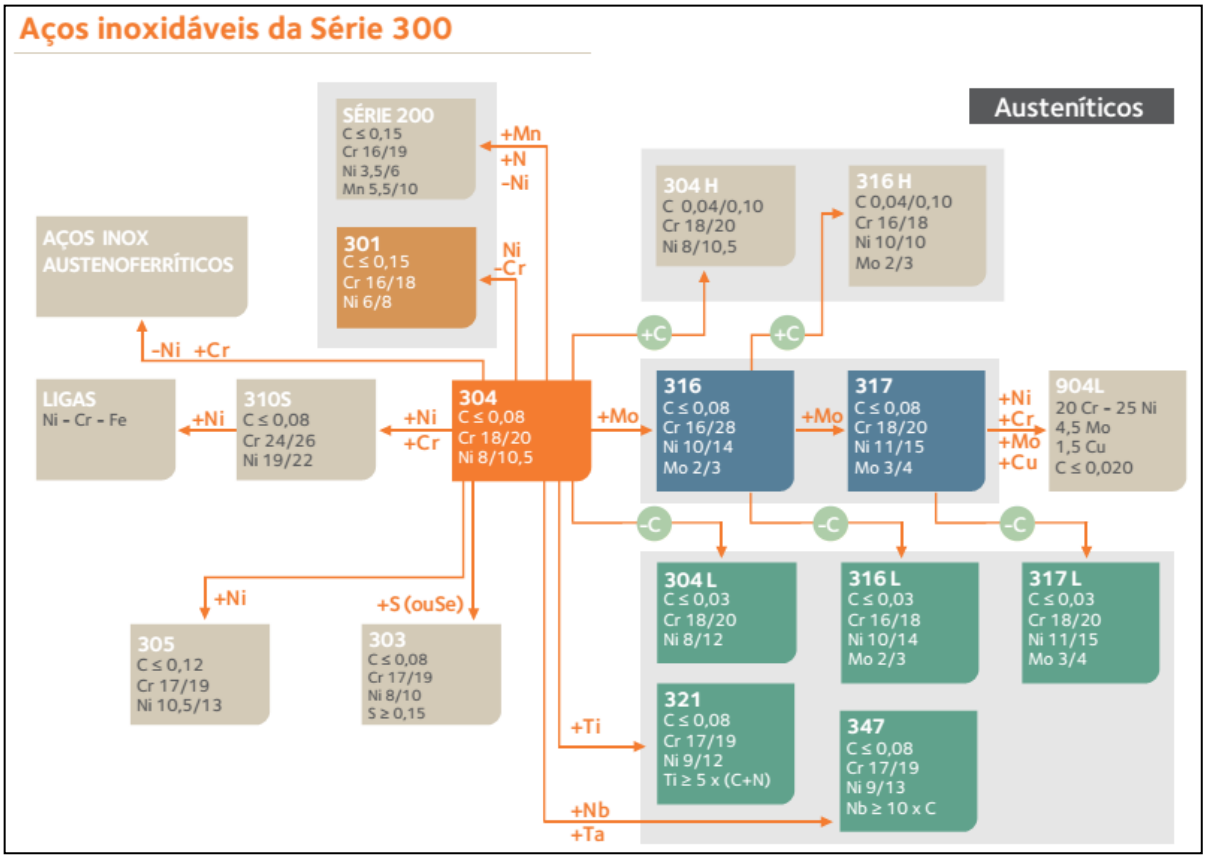
Fonte: INSG[2]

[2] de: http://seekingalpha.com/article/629141–global–nickel–market–near–term–surplus–to–be–diminished–by–indonesian–export–ban, acessado em 30/6/2012

Figura 6 - Consumo global de níquel por aplicação

O aço inoxidável é definido como uma liga de ferro que contém pelo menos 10,5% de cromo. Aços inoxidáveis com níquel em sua composição são denominados “austeníticos", uma referência à sua característica microestrutura de solução sólida, e normalmente contêm entre 6% e 22% de níquel, sendo 18% de cromo e 8% de níquel a composição mais comum. O níquel muda a estrutura do cristal de aço inoxidável de cúbico de corpo centrado (ferrítico) para cúbico de face centrada (austenítico) (IMA,1998). Os aços inoxidáveis austeníticos, comercialmente conhecidos como da série 300 (Figura 7), são frequentemente usados onde é necessário resistência a corrosão e a fratura (ALL METALS & FORGE GROUP, 2009), podendo-se citar como exemplos:

- equipamentos para indústria química e petroquímica;
- equipamentos para indústria alimentícia (cutelaria) e farmacêutica;
- construção civil;
- baixelas e utensílios domésticos.



Fonte: Arcelor Mittal[3]

Figura 7 - Aços inoxidáveis austeníticos, com níquel em sua composição

No hemisfério ocidental, a produção total de aço inoxidável tem crescido em média 4,8% ao ano desde 1950 (VALE, 2010b). Desde 2007, a participação do aço inoxidável austenítico tem permanecido entre 71% e 75% da produção global total de aço inoxidável, sendo o resto ferrítico ou martensítico. Nos últimos anos, a percentagem do tipo austenítico na produção de aço inoxidável dos Estados Unidos aumentou de 63% para 71%.

---

[3] de: ftp://ftp.demec.ufpr.br/disciplinas/EngMec_NOTURNO/TM343/artigo_acoinox_aplicacao_especificacao.pdf acessado em 15/11/2012

O mercado de aços inoxidáveis duplex tem crescido significativamente desde o desenvolvimento do processo de *smelting* de descarbonetação argônio-oxigênio (AOD) em 1968. Os aços inoxidáveis duplex têm uma microestrutura bifásica composta de grãos de aço inoxidável ferrítico e austenítico. Aços inoxidáveis duplex, produzidos inicialmente em 1930, tem aproximadamente o dobro da resistência dos aços inoxidáveis padrão mas contêm menos níquel e são menos dispendiosos do que muitos dos austeníticos (INTERNATIONAL MOLYBDENUM ASSOCIATION, 2009, p. 4-7).

Tal qual o petróleo, o níquel é um bem essencial em tempos de guerra. O níquel, assim como o cobalto, é necessário para fazer superligas utilizadas nos motores que propulsionam aviões a jato, mísseis teleguiados e alguns veículos espaciais. Além dos usos anteriormente citados, é comum o uso de aço inoxidável austenítico e de ligas de alto desempenho à base de níquel, devido à sua resistência a corrosão química, em submarinos, navios de guerra e outras aplicações militares.

3.2.4 Ocorrência

Existem basicamente dois tipos de minério de níquel: os sulfetados e os lateríticos.

Os principais minerais de minério de origem laterítica do níquel são as limonitas niquelíferas (Fe, Ni)O(OH) e a garnierita $(Ni, Mg)_3Si_2O_5(OH)_4$. No caso dos depósitos magmáticos sulfetados, o principal mineral de minério é a pentlandita $(Ni, Fe)_9S_8$. O Canadá, na bacia de Sudbury, região de Ontário, produz 30% do níquel mundial. As maiores reservas, 40% das reservas conhecidas, estão na Rússia, no depósito Norilsk na Sibéria. Outros grandes *players* são: Indonésia, Canadá, Austrália, Nova Caledônia, Colômbia, Filipinas, China, Cuba e Brasil.

Devido à grande dependência do níquel do setor de aços inoxidáveis, este se torna interessante como objeto de análise de complexidade por limitar o ecossistema de sua economia a esta indústria, evitando a necessidade de se expandir horizontalmente esta dimensão e permitindo-se concentrar a análise na direção vertical.

Os três aspectos a seguir serão detalhados em suas próprias subseções dada a sua extensão.

A evolução dos preços, sua volatilidade e motivos, bem como demais aspectos da economia mineral do níquel serão abordados na subseção 3.2, indicando instabilidades de grande interesse para a análise de complexidade e consequente busca de avisos prévios a eventos de interesse. É mostrado também o mecanismo de realimentação e inércia típico dos sistemas complexos, ao demonstrar a reação dos investidores ao preço do bem mineral.

Em seguida, na subseção 3.3, enumera-se os desafios tecnológicos que marcam a indústria do níquel em seu avanço para dominar a extração metalúrgica dos depósitos lateríticos de onde deverá vir grande parte da produção das próximas décadas. As incertezas advindas do processo, os altos investimentos e tempos de maturação necessários e a necessidade de envolver grandes corporações, normalmente subsistemas de alta complexidade em si, em *joint-ventures* para viabilizar estes empreendimentos, acrescentam ainda outras dimensões à complexidade da economia mineral do níquel.

Finalizando, ilustra-se na subseção 3.4 a técnica do Fluxo de Caixa Descontado para avaliar a viabilidade de um empreendimento mineiro, exemplificando com um empreendimento fictício de níquel a sequência de cálculos necessária ao estudo. Em seguida, é demonstrada a alta sensibilidade a pequenas variações de parâmetros do sistema, novamente típica de sistemas complexos.

3.2.5 Evolução do mercado internacional do níquel

Analisa-se nesta seção três períodos da evolução do mercado do níquel:

- o período de pós guerra, onde tipicamente a indústria e a sociedade retomam a economia de consumo a partir do legado tecnológico do conflito e da necessidade de reconstrução e reabilitação e adaptação do parque industrial bélico;
- o período entre as crises do petróleo e o final do século, marcado pela queda da União Soviética e suas implicações políticas e econômicas;
- o novo milênio, caracterizado pelo crescimento econômico da China, o *boom* das *commodities* e a subsequente recessão.

3.2.5.1 O pós-guerra (1950-1980)

Devido à sua ampla utilização em aplicações militares, o valor comercial do níquel tradicionalmente atinge picos em tempos de guerra, quando a demanda excede em muito a oferta e muitas vezes também aumenta em tempos de agitação política e instabilidade. Por outro lado, os preços ao produtor normalmente são controlados em várias destas crises por regulamentação de esforço de guerra ou controle emergencial de preços. O conflito da Coréia é uma boa ilustração de repique de preços e controle de distribuição. Durante a transição da economia civil para a militar, a demanda por níquel excedeu a oferta disponível, apesar de suas respectivas minas e usinas na América do Norte estarem operando a plena capacidade. No início do conflito, o governo dos EUA assumiu o controle da distribuição deste metal e de 1951 a 1957 toda sua produção nos Estados Unidos estava alocada pelo governo. Ao mesmo tempo, o governo também decidiu adquiri-lo para sua reserva estratégica nacional. A combinação destas ações resultou em escassez significativa de níquel para usos não militares (DAVIS, 1956). A escassez perdurou por todo o conflito, apesar da importante adição de capacidade de produção no Canadá e nos Estados Unidos e da reabilitação de minas e usinas mais antigas. Além disto, o governo dos EUA continuou a comprar níquel para reserva estratégica mesmo após o término do conflito. Como resultado, a produção não excedeu a demanda civil até o fim de 1957, quatro anos após o armistício. O preço do níquel ao produtor, acompanhando o consumo, iniciou um aumento gradual em 1950 que persistiu até 1957. Um período de excesso de oferta se seguiu, durante o qual os preços do níquel, de mercado e ao produtor, acompanharam aproximadamente a inflação. Esta situação produziu um preço constante em dólar para o metal que permaneceu razoavelmente estável por mais de dez anos.

Em 1969, as indústrias de níquel, cobre e minério de ferro no Canadá foram fechadas por consequência de uma prolongada série de greves. O Canadá era o produtor de níquel dominante no mundo à época. Os dois maiores produtores do Canadá, a Inco Ltd. e Falconbridge Ltd., foram responsáveis por 48% da produção mundial no ano anterior. Devido às greves, a produção de níquel canadense ficou quase 20% abaixo da produção de 1968 (MORRELL, 1971). As greves aconteceram em um momento em que os estoques mundiais estavam baixos e a demanda mundial estava restrita pela oferta disponível.

As greves de 1969 afetaram os preços do níquel de duas maneiras. Antes das greves, os grandes produtores, liderados pelos canadenses, controlavam o preço do níquel. A consequência de curto prazo foi um breve aumento de preços, em longo prazo, por outro lado, fez diminuir a importância do preço do produtor. Produtores canadenses e não canadenses aceleraram então os esforços para expandir operações já existentes e para colocar projetos *greenfield* em operação antes que os preços caíssem. Entre 1969 e 1974, novas minas e usinas de tratamento foram comissionadas na Austrália, Canadá, República Dominicana e Nova Caledônia. O aumento da capacidade mundial resultou em uma redução da participação dos canadenses do mercado do níquel e, consequentemente, da sua influência sobre os preços, definindo assim um ponto de inflexão na história do *marketing* do níquel.

Entre 1966 e 1973, mais de 40 depósitos de sulfetos de níquel maciços foram descobertos na Austrália Ocidental. Em meados da década de 1970, a Western Mining Corporation Ltd. (agora parte do Grupo BHP Billiton) localizou vários depósitos em torno do Domo de Kambalda e expandiu rapidamente suas operações de mineração na região de Kalgoorlie, (HOATSON; JAIRETH; JAQUES, 2006). Em 2010, a Austrália foi o quarto maior produtor de níquel primário no mundo por causa de novas descobertas em sua região ocidental, da posterior construção de um grande gasoduto de gás natural a partir do North West Shelf para Kalgoorlie, e do advento de novas tecnologias de extração.

Os preços do níquel, refletindo o consumo, aumentaram ligeiramente entre 1970 e 1975, quando o efeito cumulativo da abertura de várias novas instalações de produção começaram a ser sentidas. Em 1975, a demanda de níquel dos EUA diminuiu, parcialmente por causa do término das operações militares lideradas pelos Estados Unidos no Vietnã. Em 1977, a P. T. Inco comissionou seu complexo minero metalúrgico de Soroako na ilha indonésia de Sulawesi, adicionando produção ao mercado. Esta situação de excesso de oferta e diminuição do consumo fez os preços permanecerem estáveis até a greve da Inco, de 1978 a 1979. A greve nas operações da Inco, no Distrito de Sudbury, durou de 16 de setembro de 1978 a 3 de junho 1979 (INCO LTD, 1980, p. 4-9). Entre fevereiro de 1979 e o final do ano, a Inco elevou seis vezes o preço de seu catodo de níquel em Port Colborne. O efeito da greve da Inco nos preços foi agravado pelo fato de que os grandes produtores

estavam operando a cerca de 55% a 60% da capacidade, para reduzir estoques e melhorar a situação dos preços.

A greve da Inco ajudou a precipitar a ocorrência de mudanças importantes nos preços do níquel. Em 23 de abril de 1979, foram negociados contratos de níquel pela primeira vez na LME. O níquel tornou-se o sétimo metal negociado na LME, marcando um ponto de inflexão importante na fixação de preços do metal. Os principais produtores de níquel se opuseram inicialmente ao mecanismo de preços da LME. O negócio de níquel na LME, no entanto, cresceu de forma constante, apesar da oposição dos produtores, convencendo-os assim a reconsiderar sua posição. Atualmente, os preços do níquel são definidos pela LME e não pelos produtores. Desde 1979, o níquel se tornou uma mercadoria cujo preço é definido pela oferta e a demanda mundiais, independentemente dos custos de produção. Superada a resistência inicial, a maioria dos produtores agora concorda que a LME é um fórum prático e eficaz para o estabelecimento de um preço de referência internacional para o níquel, melhorando a transparência e a rapidez na disseminação dos preços. É difícil precisar o volume de níquel vendido de fato ao preço LME, trata-se provavelmente de uma pequena fração. Mesmo assim, o preço LME tem mais importância do que pode parecer à primeira vista por ser usado como um preço de referência para contratos de longo prazo. Por exemplo, um grande produtor de níquel pode pedir um prêmio sobre o preço LME e um produtor menor pode vender com desconto.

3.2.5.2 Da primeira crise do petróleo ao final do século XX (1980-2000)

A segunda crise do petróleo (1979-1982), desencadeada pela revolução no Irã, teve um grande efeito amortecedor sobre o consumo mundial de aço assim como da maioria dos metais. A recessão resultante que começou em meados de 1981 causou um declínio acentuado no consumo de níquel. A demanda de níquel no hemisfério ocidental caiu cerca de 8% em 1981, tendo sido esta a primeira vez desde o final da década de 1940 que a demanda regrediu por dois anos consecutivos. A recessão terminou em novembro de 1982 mas os preços continuaram a cair até 1985 por causa da redução da procura. Em 1987, o mercado mudou subitamente de direção, surpreendendo os produtores. O preço médio anual subiu de seu nível histórico mais baixo, em 1986, ao mais alto em 1988 (em termos de dólares constantes de 1992, de 1910 a 97).

O preço LME médio mensal à vista aumentou gradualmente de USD 1,60 por libra no início de 1987 para USD 2,69 em novembro. Em dezembro de 1987 subiu repentinamente para USD 3,48. O rápido aumento continuou em 1988, com o preço mensal atingindo USD 8,17 em abril. Este nível de preços teria sido inimaginável para o mercado de níquel quatro anos antes. Três foram os principais fatores responsáveis por este aumento. O primeiro foi um aumento substancial e imprevisto na demanda por aço inoxidável, a principal aplicação do níquel. Mais de 50% da produção de aço inoxidável nos Estados Unidos e na Europa é comercializada por meio de centros de serviços (empresas que compram diretamente de uma fábrica de aço inoxidável e vendem para os clientes). Os centros de serviço não publicam estatísticas detalhadas de vendas em termos de uso final, tornando-se difícil para os produtores de aço inoxidável monitorar o consumo de seu produto. O segundo fator foi que os produtores de níquel reduziram sua capacidade de produção mundial por causa dos preços baixos do metal entre o início e meados dos anos 1980. Pelo menos cinco produtores de níquel fecharam suas operações durante este período. Um terceiro fator foi a diminuição da disponibilidade de sucata de aço inoxidável.

Embora a demanda ocidental por níquel crescesse continuamente entre 1985 e 1991, o preço LME atingiu seu pico em 1988.

Segundo Choe (1990), os principais motivos do *boom* de preços foram:

- O crescimento da produção industrial da OCDE - Organização para Cooperação Econômica e Desenvolvimento - foi o fator mais consistentemente importante na escalada dos preços dos metais. O crescimento da demanda, porém, foi amplamente compensado pelos previsíveis aumentos na produção de metais. Assim, de certo modo, o *boom* dos preços de metais resultou principalmente de mudanças em outros fundamentos do mercado - quais sejam, rupturas de abastecimento, baixos estoques e desvalorização do dólar norte-americano - todos estes fatores de natureza transitória;
- a depreciação do dólar norte-americano foi o contribuinte dominante para o aumento dos preços de metais durante a primeira parte do *boom* e, particularmente, para o níquel, chumbo e zinco;
- a descontinuidade no suprimento e os baixos níveis de estoque tiveram impacto importante sobre nos preços, especialmente em 1988. Apesar do

grande destaque dado à época ao papel destas interrupções no fornecimento, os baixos níveis de estoque foram o fator mais importante e mais consistente;

- embora os fundamentos do mercado expliquem a maior parte do *boom* dos preços, o componente inexplicável ainda é considerável, o que sugere que especulação excessiva ou a ocorrência de bolhas, especialmente no caso do níquel em 1988, tenham exacerbado os aumentos de preços.

Após o pico de 1988, os preços diminuíram ano a ano até 1994, causando o encerramento das atividades da mina da Glenbrook Nickel Company (Nickel Mountain, OR) e sua refinaria (Riddle, OR), então as únicas operações de produção de níquel primário ainda em funcionamento nos Estados Unidos. Os motivos para esta tendência paradoxal foram triplos: os embarques de níquel da antiga União Soviética para o Ocidente (URSS) começaram a aumentar gradualmente, a disponibilidade de sucata aumentou em todo mundo e a produção mundial de níquel primário aumentou.

A dissolução da União Soviética em dezembro de 1991 produziu grandes mudanças na economia russa, um dos quais foi a privatização parcial da maior produtora de níquel do país, a RAO Norilsk Nickel. Ao mesmo tempo, a redução do tamanho do complexo industrial-militar da URSS causou acentuada redução no consumo de níquel da Rússia. Em 1997, a Rússia consumiu apenas 20.000 t de níquel primário, em comparação com 180.000 t em 1989 (INSG, 1998). O consumo russo enfraqueceu ainda mais em 1998, caindo para menos de 18.000 toneladas. Estas mudanças levaram a um aumento das exportações de níquel primário da Rússia, comprimindo os preços mundiais de níquel primário e de sucata niquelífera. As exportações russas de sucata de aço inoxidável e sucatas de alto níquel para a União Europeia (UE) também aumentaram acentuadamente, deprimindo ainda mais os preços mundiais do níquel. Mais de uma década depois, a Rússia ainda é o líder mundial em produção de níquel e tem, supostamente, significativos recursos subexplorados na Sibéria e no Extremo Oriente. Em 2010, mais de 85% da produção da Rússia veio de minas operadas no Ártico pela Norilsk Nickel.

A redução do consumo de níquel na Rússia, um período de recessão no Japão e problemas econômicos em outras partes da Ásia Oriental provocaram o declínio do preço LME do níquel, caindo de USD 3,20 por libra, em junho de 1997 para USD 1,76 em dezembro de 1998. Entre 1997 e 1999, os produtores ocidentais

de níquel foram obrigados a encontrar novos meios para cortar custos em face da baixa de preços do metal. Os preços começaram a melhorar no primeiro semestre de 1999, voltando ao nível de USD 2,25 a USD 2,50 por libra. O comissionamento de três complexos mínero-metalúrgicos de níquel na Austrália Ocidental no início de 1999, no entanto, pressionou novamente os preços para baixo. Os três complexos usavam variações de um processo de lixiviação ácida sob pressão (PAL) para extrair níquel e cobalto a partir de minérios lateríticos/ limoníticos. Todas as três operações - Bulong, Cawse e Murrin Murrin - passaram por problemas de *start-up* associados à nova tecnologia PAL. A *joint venture* Murrin Murrin conseguiu superar a maior parte destes problemas e no ano de 2013 produziu um total de 40.000 t de níquel, entre metal e concentrado (GLENCOREXSTRATA, 2013). A Bulong e a Cawse, no entanto, acabaram por suspender suas atividades em função da deterioração dos preços do níquel.

3.2.5.3 O *boom* do milênio e a crise (2001-2010)

De 2001 a 2005, o consumo global de níquel cresceu em média 3,4% ao ano. Este crescimento foi em grande parte impulsionado pelo aumento da utilização do aço inoxidável no mundo inteiro e pela rápida expansão da economia na China. Em janeiro de 2006, o preço LME médio mensal à vista foi de USD 6,60 por libra - preço relativamente elevado em termos históricos. No verão de 2006, o aumento da produção global de aço inoxidável, especialmente na China, criou um déficit temporário no abastecimento de níquel, levando o preço LME mensal à vista a um máximo histórico de USD 23,66 por libra em maio de 2007. Neste ponto, a demanda por aço inoxidável começou a oscilar em muitos países, com exceção da China, provocando uma queda de preços gradual. No quarto trimestre de 2008, a economia global começou a ceder. O preço LME médio à vista em dezembro de 2008 caiu para USD 4,39 dólares por libra.

Em agosto de 2005, a Inco Ltd. iniciou a operação de Voisey’s Bay, depósito de níquel-cobre-cobalto de grande porte no noroeste da província canadense de Labrador (MCCUTCHEON, 2006, p. 38,11-38,12). O desenvolvimento do depósito teve um impacto importante no mercado mundial de níquel por causa de suas grandes reservas, do alto teor de seus minérios e de sua localização na costa do Atlântico Norte. Em 2009, a Vale SA, sucessora da Inco, iniciou a construção de um complexo hidrometalúrgico de USD 2,8 bilhões em Long Harbour, Newfoundland,

projetado para processar os concentrados da Baía de Voisey e reduzir significativamente os custos de transporte para a empresa (BAIRD, 2011; VALE, 2010a).

A tecnologia de processamento dos minérios lateríticos tem avançado significativamente desde o início da construção de Murrin Murrin em 1997. Em 2010, três complexos de processamento hidrometalúrgico estavam sendo preparados para comissionamento - um na ilha principal da Nova Caledônia, outro em Madagascar e o terceiro em Papua Nova Guiné. Em 2008, uma usina de ferroníquel foi comissionada na Coreia do Sul. No final de 2010, duas usinas de ferroníquel também foram comissionadas no Brasil e uma terceira estava sendo construída na Nova Caledônia. Todas as sete instalações foram projetadas para processar minérios lateríticos. A criação destas 337 mil t/ano de capacidade adicional de produção ocorreu em um momento em que o mundo estava procurando se recuperar da recessão global de 2008-2009.

Em março de 2009, pela primeira vez na história, os estoques da LME atingiram mais de 100.000 t e continuavam crescendo (INSG, 2009). Felizmente para os produtores, a produção de aço inoxidável na China estava em uma alta histórica. Os estoques da LME acabaram chegando a 136.000 t em dezembro de 2010 mas começaram a diminuir lentamente com a dissipação da recessão e a retomada da demanda por aço inoxidável.

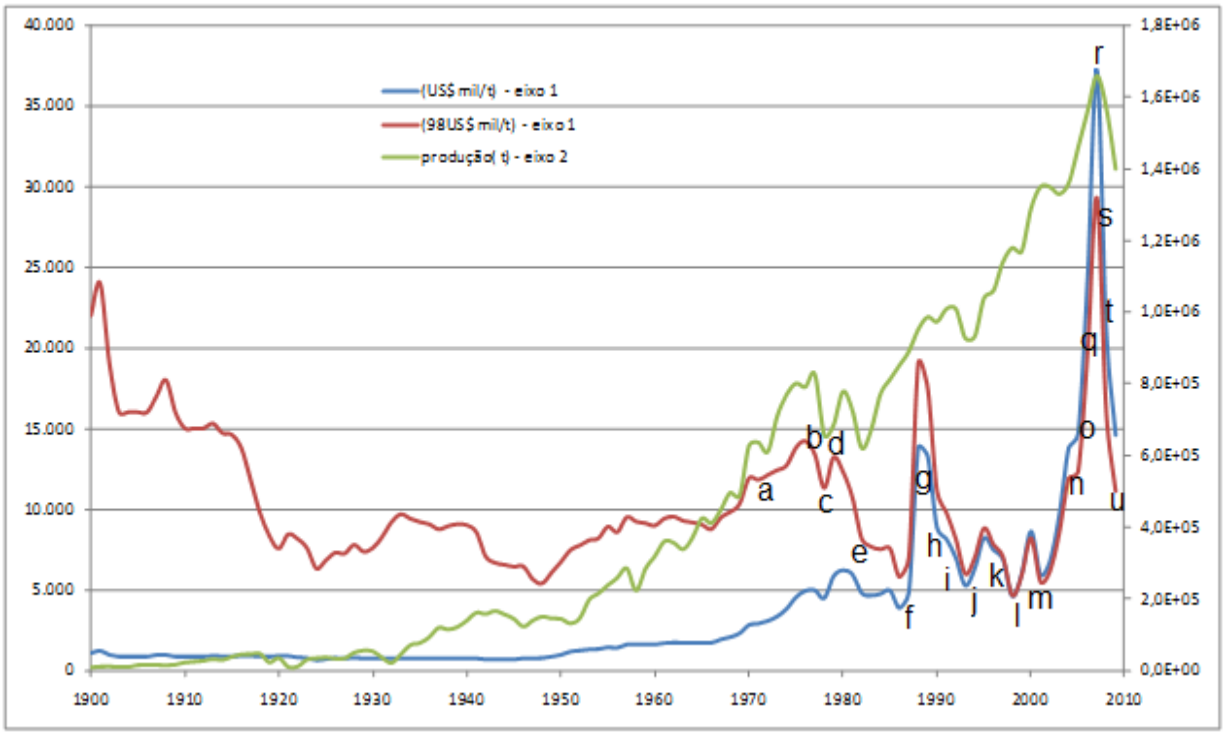
Na Figura 8 encontra-se um gráfico com a evolução da produção e dos preços do níquel em dólares históricos e constantes de 1998, desde 1900 a 2010. A linha vermelha (98 USD mil/t) considera o valor do dólar levado a valores de 1998, ou seja, considerando-se a inflação anual norte-americana, o que faz com que seus valores sejam superiores aos valores históricos em anos anteriores a 1998 e inferiores, nos anos subsequentes a 1998.

Observam-se ainda na Figura 8 os marcadores literais para eventos significativos (lista não exaustiva) que afetaram os preços do níquel desde 1970, período recente de maior volatilidade:

a. 1972 - Comissionamento da fundição de ferro-níquel da Falconbridge em Bonao, República Dominicana;

b. 1977 - Comissionamento da mina e refinaria da P. T. International Nickel Indonesia (PT Inco) em Soroako, início de mineração em laterita na Guatemala;
c. 1978 a 79 - Greve no distrito de Sudbury, em Ontário, reduziu a produção da mina canadense em mais de 40 por cento;
d. 1979 - O níquel tornou-se o sétimo metal a ser negociado na London Metal Exchange (LME);
e. 1981 a 1982 - A recessão mundial provocou uma queda drástica da demanda e consequentemente dos preços de níquel;
f. 1987 a 1988 - O Governo da República Dominicana passou a cobrar um alto imposto para exportação de ferroníquel; a Falconbridge Dominicana reagiu, limitando os embarques de ferroníquel e declarando *force majeure*;
g. 1987 a 1989 - Quebras no abastecimento; produção de aço inoxidável no mundo ocidental passou da marca de 10 milhões de toneladas por ano;
h. 1990 - Desenvolvimento da bateria recarregável de hidreto metálico de níquel;
i. 1991 - Dissolução da União Soviética, seguida por um forte aumento nas exportações do níquel russo;
j. 1994 - A Sherritt Inc. e o Governo de Cuba formaram uma parceria para recuperar níquel e cobalto a partir de minérios lateríticos em Moa, com o concentrado dos dois metais sendo enviado a Alberta, Canadá para separação e o *smelting*;
k. 1994 a 1998 - RAO Norilsk Nickel foi formada como consequência da privatização parcial, feita pelo novo Governo da Rússia, das operações de mineração e *smelting* estatais nas penínsulas de Kola e Taimyr;
l. 1998 a 2000 - Importante reestruturação da indústria de aços especiais nos Estados Unidos;
m. 2001 - Fusão da BHP Ltd. da Austrália com a Billiton plc, criando um grupo de recursos globais com interesses em níquel e outros metais base;
n. 2005 - A Inco Ltd. Iniciou a produção de concentrado de cobre e níquel na mina de Voisey Bay em Labrador;
o. 2005 a 06 - Várias fusões e aquisições mudaram drasticamente a participação societária das empresas da indústria do níquel;

p. 2006 - A China tornou-se líder mundial em produção de aço inoxidável, superando a União Europeia. A China começou a produção de ferro-gusa de níquel, também conhecido como NPI;
q. 2007 - O grupo BHP Billiton concluiu a construção e comissionamento de sua mina de Ravensthorpe, na Austrália Ocidental;
r. 2007 a 2008 - Crise financeira global;
s. 2008 - A Pohang Iron and Steel Co. Ltd. e sua parceira, a Société du Sud Pacifique Minière, SA, comissionou uma refinaria de ferro-níquel de classe mundial em Gwangyang, República da Coreia. A refinaria assegura o fornecimento regular de níquel aos produtores de aço inoxidável da Coreia;
t. 2008 a 09 - A recessão global leva a uma queda dramática na produção primária de níquel. A China foi o principal consumidor de níquel primário em 2009 e também o maior produtor de aço inoxidável;
u. 2010 - A Vale SA comissionou dois grandes complexos de mineração e processamento: uma operação de extração hidrometalúrgica na Nova Caledônia (Goro) e uma refinaria de ferro-níquel no Estado brasileiro do Pará (Onça-Puma).



Fonte: USGS[4]

[4] *de:* *http://minerals.usgs.gov/ds/2005/140/nickel.pdf* acessado em 2/2/2013

Figura 8 - Evolução da produção e dos preços do níquel em dólares históricos e constantes de 1998, desde 1900 a 2009

3.2.6 Análise dos fatores que influenciam os preços e sua volatilidade

Nesta seção serão vistas algumas análises e interpretações de vários autores sobre os mecanismos que influem nos preços e em sua volatilidade. A maioria dos autores usa as séries históricas do níquel e demais *commodities* minerais publicadas pelo USGS ou por outras instituições como o Fundo Monetário Internacional ou o Banco Mundial ou ainda pela própria LME.

Os preços dos produtos de níquel - minério, concentrado, *matte*, ligas Fe-Ni - e do próprio metal, em qualquer mercado, são estabelecidos com base no preço do metal na Bolsa de Metais de Londres (London Metal Exchange - LME) do dia considerado como de fechamento da transação, menos os descontos ou mais o prêmio, se for o caso, devidos às quantidades de níquel e cobalto contidas no produto.

O principal objetivo da LME, desde a sua abertura, em 1877, tem sido atuar como um mercado de futuros, fornecendo proteção aos produtores, comerciantes e consumidores contra as flutuações imprevisíveis de preços (RUDOLF WOLFF & CO., 1995). Atualmente a LME conta com mais de 90 empresas associadas. Destas, 12 participam dos pregões que ocorrem duas vezes por dia. Ao contrário de outros mercados de futuros, a LME também serve como um centro de comércio físico e tem uma rede internacional de armazéns autorizados. No caso do níquel, a maior parte da armazenagem está em Rotterdam, na Holanda e, em menor grau, em Cingapura.

A participação dos produtores na LME aumentou consideravelmente desde 1985 por causa dos seus recursos de *hedging* e opções. Em 2010, os preços da LME foram o principal mecanismo de precificação usado por produtores e consumidores de níquel do mundo inteiro. Os preços da LME e respectivas estatísticas estão disponíveis 24 horas por dia em seu *website*, minimizando, assim, a arbitragem. Os preços da LME também são citados diariamente em várias publicações semanais de negócios. Em 2010, o sistema de preços da LME teve apoio de sete dos principais produtores de níquel do mundo. Três dos sete tinham subsidiárias que eram membros da LME na categoria *Associate Trade*, o grupo BHP Billiton, a Vale S/A e a Xstrata plc (por meio da sua principal acionista, a Glencore

International AG). A LME é regulada pela Autoridade de Serviços Financeiros, órgão não governamental independente com poderes estatutários conferidos pelo Parlamento britânico.

O *hedging*, uma forma de seguro disponível para os consumidores, produtores e *traders*, é um componente importante do mercado de futuros e reduz a exposição de um produtor a mudanças de preços enquanto o níquel negociado ainda está sendo produzido. Os especuladores têm um papel importante no mercado de futuros, pela liquidez que trazem e os riscos que assumem, os quais os que optam pelo *hedging* tentam evitar.

É possível citar alguns eventos na indústria de mineração e de transformação mineral como exemplos de fatores que influenciam os preços das *commodities* minerais, tais como mudanças no consumo, produção, ações que resultem em abertura ou fechamento de minas, usinas ou refinarias, greves ou mudanças tecnológicas. A indústria de *commodities* minerais, no entanto, não opera isoladamente, estando sujeita a influências externas tais como a deflação do dólar dos EUA, o colapso da União Soviética, as recessões econômicas, o rápido crescimento da economia chinesa e restrições comerciais.

Eventos econômicos tais como as guerras mundiais, o crescimento industrial das nações, a crise financeira asiática (1997-98), recessões e inflação afetam os preços dos metais. Avanços tecnológicos como os que possibilitaram o crescimento das indústrias elétricas e de comunicação, consumidoras de fio de cobre, ou a posterior transição para a tecnologia de comunicação sem fio, também afetam os preços dos metais.

Eventos específicos de cada *commodity*, como a construção de novas instalações de produção ou novos processos, novos usos (ou a interrupção de usos tradicionais), o fechamento inesperado de minas e usinas (desastres naturais, interrupções de fornecimento, acidentes, greves e assim por diante) ou reestruturação da indústria, também afetam seus preços.

Os efeitos destes eventos são imediatamente sentidos, independentemente de seu tipo, no entanto sua persistência pode variar. Uma greve geralmente dura muito menos que uma guerra. Um desastre natural pode ser mais curto do que uma

greve. A extensão e a duração de um evento afeta o preço por meio do mecanismo de oferta e procura.

Quanto a seu alcance, estes fatores podem afetar:

- todas as *commodities*, globalmente;
- algumas *commodities*, globalmente;
- todas as *commodities*, área geográfica limitada;
- algumas *commodities*, área geográfica limitada.

Dependendo do ponto de vista da análise, a percepção dos fatores que influenciam o preço das *commodities* pode variar. De um modo geral, analistas de negócios acham que o equilíbrio entre oferta e procura é o que determina o preço; analistas de investimentos acham que são as expectativas que desempenham um papel importante na sua determinação; analistas de *commodities* acham que os preços aumentam com o decréscimo do número de semanas de duração dos estoques e, finalmente, os analistas do mercado financeiro acham por sua vez que o aumento do investimento especulativo em *commodities* é o responsável pelo aumento dos preços. A seu modo, todos tem parte da razão.

Wagner (2003), explica os mecanismos de oferta e demanda que atuam nos preços e volumes de *commodities* negociadas no mercado, como resultado das mudanças de necessidades e aspirações das pessoas, da evolução das tecnologias utilizadas para acompanhar estas mudanças, das mudanças das fontes de recursos naturais e de outros fatores produtivos. Como exemplo, considere-se uma situação hipotética de oferta e demanda de níquel em mercados onde haja grande número de compradores e vendedores, sem interferência do governo ou monopolização. Nestas condições, teoricamente, um preço de equilíbrio deverá ser atingido.

A Figura 9 mostra este preço de equilíbrio em USD 0,75 por unidade. Para compreender o motivo deste valor, suponha-se outro preço de, por exemplo, USD 1,25 por unidade. Observa-se também que os vendedores ofereceriam 3,4 milhões de unidades de níquel para o mercado mas os compradores se interessariam em adquirir apenas 3,0 milhões de unidades. Haveria um excedente de níquel no mercado. Alguns vendedores ficariam com estoque excessivo de níquel e poderiam ter que reduzir suas atividades de produção. Para vender este excedente de níquel, os vendedores precisariam reduzir seus preços. Uma vez que a quantidade

demandada pelos compradores aumenta a preços mais baixos, o corte de preço aliviaria o problema de excesso de estoque. Além disto, devido aos preços mais baixos, outros vendedores ofertariam menos níquel no mercado, uma vez que tais preços podem não ser suficientes para cobrir seus custos de produção.

Se por sua vez o preço estivesse abaixo de USD 0,75 por unidade, as forças de mercado novamente agiriam no sentido de restaurar o equilíbrio no preço USD 0,75 por unidade. Por exemplo, se o preço fosse de USD 0,50 por unidade, a quantidade de níquel ofertada no mercado seria de 3,1 milhões de unidades mas os compradores procurariam comprar 3,5 milhões de unidades, provocando escassez de níquel. Alguns vendedores ficariam sem estoque de níquel e alguns compradores não conseguiriam comprá-lo. Alguns vendedores poderiam tentar cobrar um preço mais elevado e ainda assim conseguir vender toda a sua produção. Por outro lado, ao perceberem a situação de escassez, alguns compradores poderiam estar dispostos a pagar mais pelo níquel. Todas estas ações fariam o preço subir e fechar a lacuna entre a quantidade demandada de 3,5 milhões e a quantidade ofertada de 3,1 milhões. O preço subiria até atingir o nível de USD 0,75 por unidade. Neste ponto, as quantidades demandadas e ofertadas seriam as mesmas e o mercado retornaria ao ponto de equilíbrio.

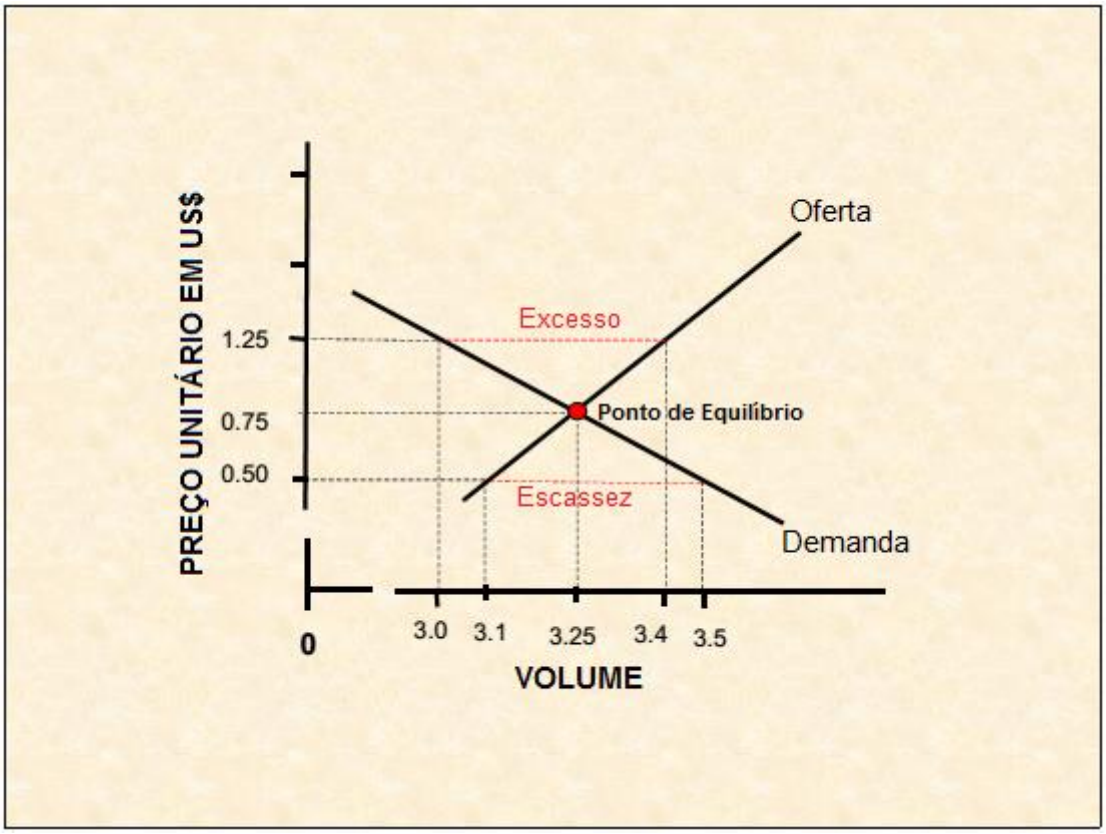
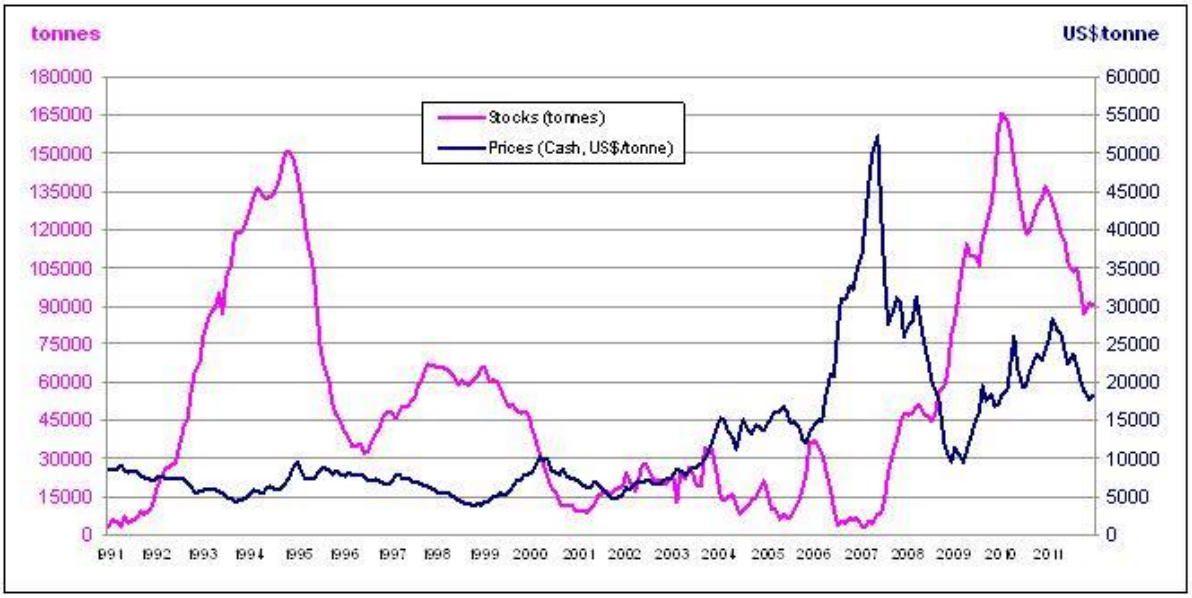


Figura 9 - Situação hipotética de oferta-demanda[5] para o níquel (adaptado de Truett e Truett, 1982)

O preço de equilíbrio do mercado e o volume negociado de um bem não vão mudar enquanto as curvas de demanda e de oferta para o item não se deslocarem. No entanto uma mudança em uma ou ambas destas curvas irá conduzir a um deslocamento do ponto de equilíbrio para uma nova posição.

No caso do níquel, o efeito deste mecanismo pode ser observado na Figura 10, na qual são exibidos dados reais mensais de preços e estoques de níquel da LME, no período de 1991 a 2011. É claramente visível a relação inversa entre variação de estoque e de preço.



Fonte: INSG, de: http://www.insg.org/prodnickel.aspx acessado em 30/4/2013

Figura 10 - Evolução de preços e estoques LME para o níquel, de 2005 a 2010

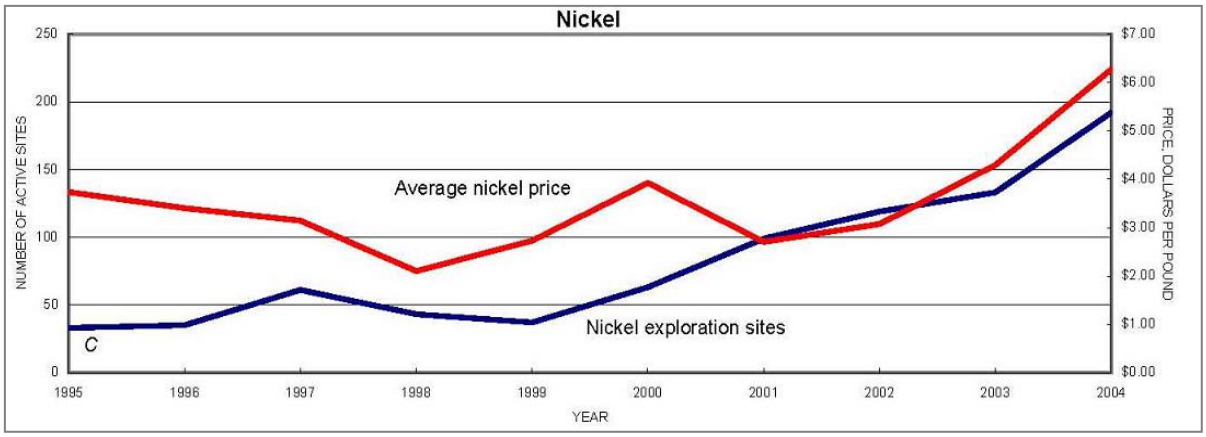
Rutherford (2002) também entende que o preço pode ser compreendido como um sinalizador da magnitude relativa entre oferta e demanda, conforme exposto nos parágrafos anteriores. No caso de um mercado perfeitamente competitivo, os ajustes de preço se fariam de forma rápida e suave até atingir o novo patamar de equilíbrio. Rees (1985), por outro lado, identificou quatro imperfeições básicas que afetam o mercado de *commodities* minerais e que contribuem para a volatilidade dos seus preços:

---

[5] Para fins ilustrativos, as curvas de oferta e demanda estão representadas por linhas retas. Maiores detalhes sobre a relação de oferta e demanda poderão ser encontrados em Miller (1998).

1. Atraso na disponibilização de produção adicional - Os produtores levam pelo menos quatro anos (Rees, 1895) para suprir a lacuna entre produção e demanda, o que leva os preços a subirem mais do que se este atraso fosse menor;
2. Atraso em desativar o excesso de produção - Quando a demanda diminui, os produtores adiam a decisão de desativar produção enquanto há resultados marginais na operação, o que leva os preços a caírem mais do que se a produção excessiva fosse interrompida mais cedo;
3. Inelasticidade do preço de demanda - a maior parte das *commodities* minerais é utilizada na indústria da construção civil, mecânica, automotiva e de outros bens intermediários. A demanda destas indústrias por *commodities* minerais depende basicamente do crescimento econômico. Por outro lado, há várias razões que tornam o preço de demanda inelástico, como a indisponibilidade de substitutos ou alto custo de substituição das *commodities*, a essencialidade e o baixo percentual na participação do custo da *commodity* no preço final do produto acabado, o que contribui para a volatilidade de preços, pelo menos a curto prazo;
4. Apenas uma pequena parte do volume de *commodities* minerais é negociada em bolsas, o que significa que uma pequena parcela da produção total deve refletir o desequilíbrio entre oferta e demanda de todo o mercado, aumentando assim a volatilidade do preço.

Ilustrando os itens 1 e 2, pode-se observar na Figura 11 o aumento do nível de preços do níquel como precursor do interesse dos investidores em atividades de explotação de minas do metal, destacando o interesse marginal na atividade quando os níveis de preço estão próximos ou abaixo dos custos de produção dos empreendimentos mais eficientes, o que ocorreu até cerca do ano 2000. A partir de 2001, com preços melhores motivados basicamente pelo aumento da demanda de níquel pela China, verifica-se a reabertura de minas paralisadas, o aumento de produção nas minas em funcionamento e investimentos em novos empreendimentos mineiros. É interessante observar também a inércia da produção, caracterizada pelo atraso entre a variação do preço e o efeito no número de empreendimentos ativos devido ao tempo necessário para tomada de decisão e para, em seguida, ativar ou desativá-los.



Fonte: USGS, http://pubs.usgs.gov/ds/2005/139/ acessado em 12/4/2013.

Figura 11 - Evolução da Atividade Mineira de Ni x Preço - 1995/2004

A seguir enumeram-se alguns outros fatores de influência na estabilidade dos preços, além dos já citados:

globalização - A globalização tornou-se importante por causa do aumento do número de países protagonistas na produção e no consumo de *commodities* minerais nas últimas décadas. Eventos em qualquer um destes países pode afetar o preço das *commodities*. Mesmo alguns eventos entre países, como alterações nas taxas de câmbio, podem influenciar os preços;

governos - Os governos estabelecem políticas comerciais (imposição ou suspensão de tributos, penalidades e quotas) que afetam a oferta por meio de regulação, restringindo ou incentivando o fluxo de materiais. Estabelecem regras para a extração dos recursos minerais e são também fonte de demanda ao criar estoques e fonte de suprimento, quando os oferecem ao mercado;

geopolítica - Eventos geopolíticos que envolvem governos ou paradigmas econômicos e conflitos armados podem causar mudanças importantes. Historicamente, houve duas guerras mundiais e grande reestruturação das economias nacionais;

crescimento - Empresas se desenvolvem e se reorganizam. Mesmo com minucioso planejamento do empreendimento, a demanda pode superar a oferta se novas instalações de produção não entrarem em operação no prazo previsto ou se não atingirem o desempenho esperado. Por outro lado, a oferta pode superar a demanda se um aumento de capacidade produtiva superar a capacidade da indústria de jusante em absorvê-la;

especulação - Segundo a teoria econômica, o efeito da especulação deveria ser de estabilizar o mercado, pois acrescentaria uma demanda maior em períodos de baixos preços e uma oferta maior em períodos de alta. Esta ação, no entanto, é contestada por alguns autores. Rees (1985) argumenta que muitos dos negociantes de *commodities* metálicas nas bolsas são empresas da cadeia produtiva, as quais não conseguem reter estoques de metal em períodos de recessão e vendem suas posições, baixando ainda mais os preços. Quando o mercado melhora e estas mesmas empresas recuperam sua capacidade financeira, suas aquisições de novas posições na bolsa impulsionam por sua vez os preços para cima. Uma razão ainda mais genérica da contribuição da especulação para o aumento da volatilidade dos preços é apontada por Hart e Kreps (1986), qual seja, os especuladores não vendem na alta e compram na baixa, como é comum se supor, mas compram quando há perspectiva de alta e vendem quando há perspectiva de baixa, agindo desta forma no sentido de reforçar a tendência;

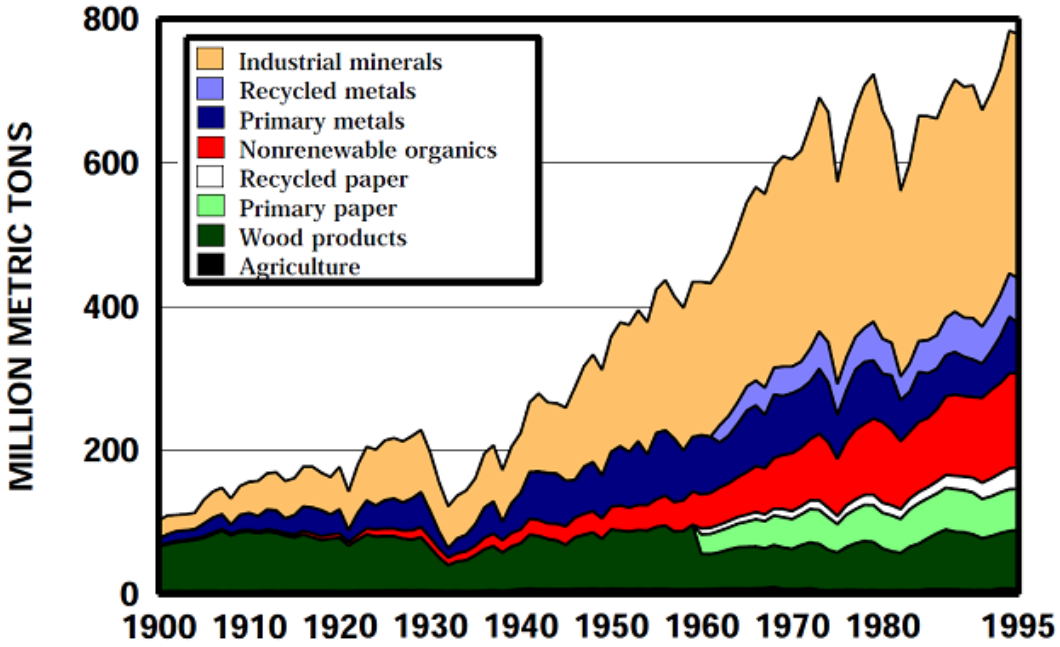
taxas de câmbio - Commodities que têm seus custos de produção calculados em uma moeda e são comercializadas em outra tem seus preços vinculados à taxa de câmbio entre as duas moedas (SLADE, 1988);

taxa de inflação - O nível de inflação no país de origem pode ter influência no custo para o produtor, levando a variações no preço da *commodity*;

custos de produção - custos de energia, impostos, mão de obra e novas tecnologias, entre outros, afetam o preço das *commodities* minerais;

estrutura do mercado primário - Em um mercado competitivo, o que os produtores podem fazer em reação à flutuação dos preços é apenas controlar a produção. Em mercados onde haja oligopólios, por outro lado, os produtores podem usar qualquer combinação de alteração de preços, produção e estoques como resposta a uma alteração na demanda. Desta forma, mercados mais controlados tendem a ter condições mais estáveis (SLADE, 1988). A verticalização, por sua vez, protege as empresas das instabilidades de preço, entretanto, quanto maior o número de empresas verticalizadas, menor a parcela de *commodities* negociadas no mercado aberto (SLADE, 1988) e, como consequência já vista anteriormente, maior a volatilidade dos preços;

estrutura do mercado secundário (reciclagem) - Segundo Slade (1988), mercados secundários maiores levam a uma maior estabilidade de preços. Um aumento inesperado de demanda pode ser parcialmente satisfeito por meio da produção secundária, normalmente mais ágil para reagir à demanda que a primária (ALONSO, 2010). O crescimento da importância do mercado secundário como fonte alternativa das *commodities* metálicas pode ser observado a partir da década de 1960 na Figura 12.



Fonte: USGS.

Figura 12 - Crescimento do mercado secundário de *commodities* metálicas

O ferroníquel é de cerca de 5 a 9 vezes mais caro do que ferro-cromo e 30 a 50 vezes mais caro do que o ferro-gusa, dependendo da situação do mercado. Como regra geral, a sucata de aço inoxidável austenítico (cromo e níquel) é cerca de três vezes mais valiosa do que a do ferrítico (cromo somente). Como o níquel é o componente de maior valor no aço inoxidável austenítico, os preços da sucata austenítica dos tipos 304 e 316 acompanham de perto os dos catodos de níquel, a menos de uma eventual escassez de ferro-cromo (Figura 13).

No caso dos Estados Unidos, quase todo o aço inoxidável é produzido em fornos de arco elétrico. Superligas à base de níquel e outras ligas de níquel-cromo também são normalmente feitas em fornos de arco elétrico. As características do

forno elétrico permitem que o operador utilize uma grande percentagem de sucata na carga, reduzindo o consumo de cromo e níquel primários.

Embora muitos tipos de sucatas de níquel sejam reciclados nos Estados Unidos, a maior parte está na forma de aço inoxidável. Em 2010, a sucata de aço inoxidável foi responsável por cerca de 85% de níquel recuperado naquele país. A sucata é responsável por cerca de 80% do total das matérias-primas em algumas instalações de produção de aço inoxidável da Europa e normalmente por 60% a 70% nos Estados Unidos. O restante é composto de ferroligas ou metais primários. A maior parte da sucata é de aço inoxidável ferrítico ou austenítico convencional. A sucata é muitas vezes composta de diversos tipos de materiais e pode conter pequenas proporções de aço de baixa liga, superligas e outras ligas de alto níquel-cromo e/ou finos de ferro-cromo de alto carbono. Uma alta porcentagem de sucata na carga total reduz o tempo de fusão e o consumo de energia elétrica mas por outro lado torna mais difíceis os ajustes finais de composição na liga. Nos últimos anos, algumas usinas foram forçadas a reduzir a proporção de sucata na carga dos fornos a 30% ou 40% por não a encontrarem disponível em qualidade e preço razoáveis.

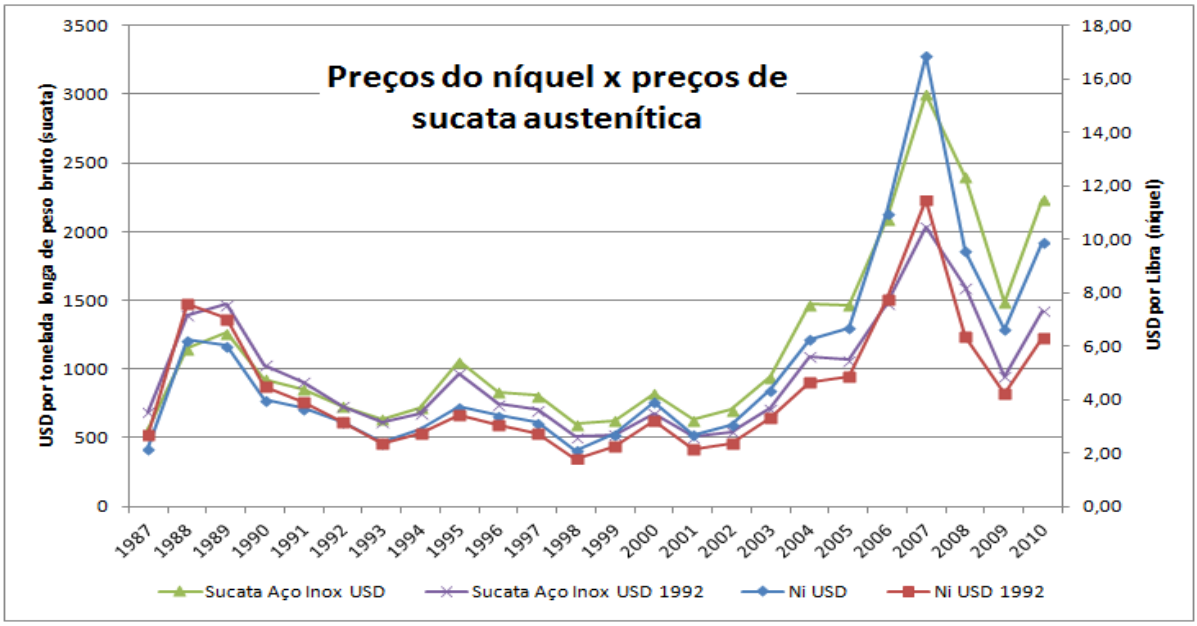


Figura 13 - Preços do níquel x preços de sucata austenítica

O níquel pode também ser recuperado a partir de sucata não ferrosa, como a de cobre-níquel (Monel®) e a de superligas (Inconel®).

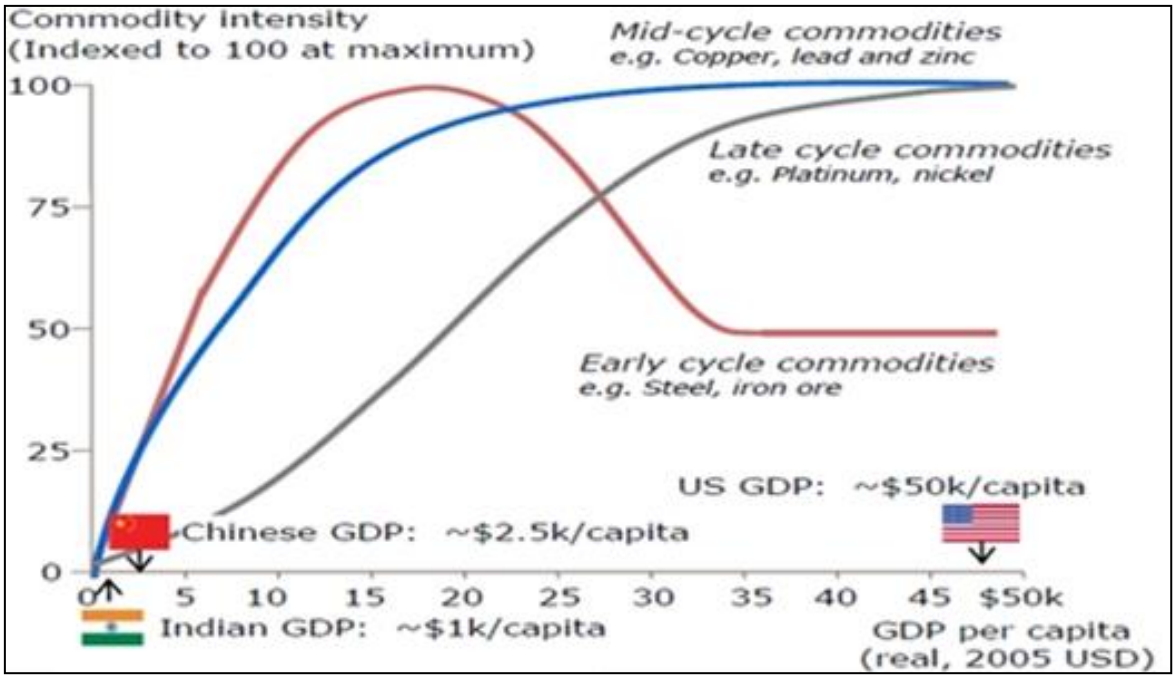
Coprodutos - Se uma determinada *commodity* mineral é coproduto de outra, não haverá como alterar sua produção em resposta a uma variação nos preços, o que leva a uma amplificação de sua respectiva flutuação.

Facilidade de substituição - quanto mais fácil for substituir uma *commodity*, mais estáveis serão seus preços (SLADE, 1988). Ao aumentar de preço, a *commodity* terá sua demanda imediatamente reduzida, devido à facilidade de substituição, o que agirá no sentido de neutralizar o aumento de preço.

Estabilidade de mercado do produto final - Se o produto final estiver sujeito a instabilidades de preço, esta instabilidade de mercado pode se refletir no preço da *commodity* mineral (SLADE, 1988).

Interrupções de fornecimento - Greves, sanções econômicas, guerras, acidentes, entre outras causas, podem afetar a oferta e, portanto, o preço das *commodities*.

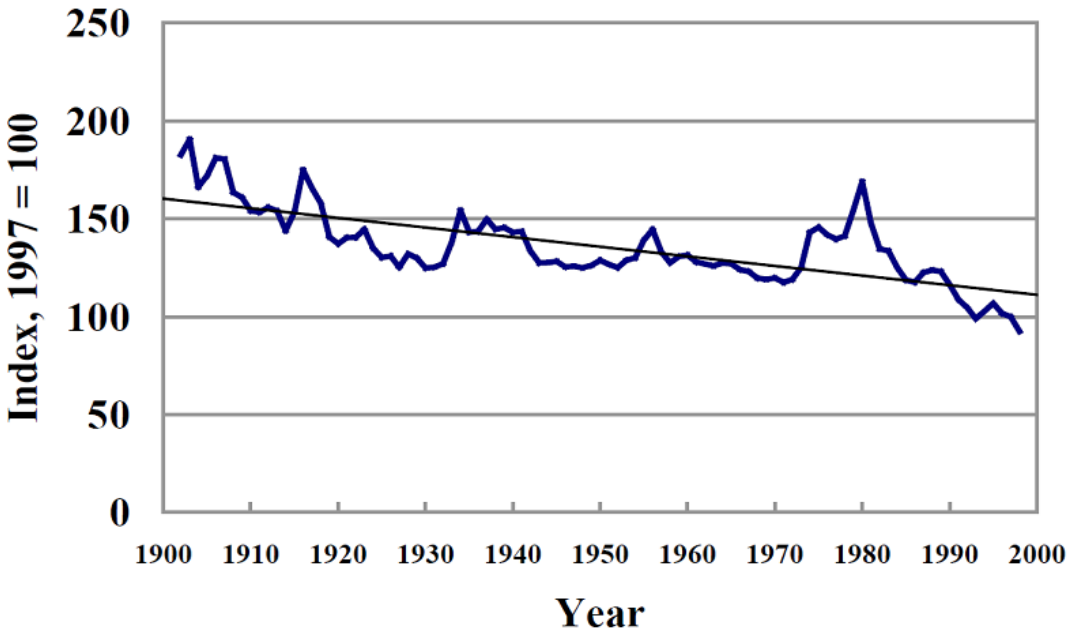
Ciclo de maturidade econômica das nações - As nações, em seu ciclo de desenvolvimento, tem sua demanda de *commodities* minerais regida por sua maturidade econômica. Por exemplo, o desenvolvimento de um país que está construindo infraestrutura rodoviária, ferroviária, de utilidade pública e de construção civil, apresenta uma maior demanda de minério de ferro e de aço do que seria de se esperar de um país que já tenha esta infraestrutura bem desenvolvida. A Figura 14 ilustra esta situação. A figura mostra no eixo horizontal o PIB per capita, com as posições da Índia, da China e dos Estados Unidos marcadas como exemplos. O eixo vertical é normalizado em 100 para o máximo. As três linhas mostram a intensidade de uso de *commodities* ao longo da maturação da economia das nações, com o ferro/aço sendo gradualmente substituído por outros metais à medida que a demanda por infraestrutura diminui e economia percorre os ciclos inicial, médio e avançado.



Fonte: Xtrata, IMF, USGS, CIA Factbook, Bloomberg e CRU

Figura 14 - Intensidade de uso de *commodities* - ciclos econômicos

Escassez - Em 1963, Barnett e Morse demonstraram em seu estudo seminal que os preços das *commodities* minerais estavam em declínio, à época, contra a expectativa então vigente. Em que pese críticas de outros autores (SLADE, 1982), este comportamento se manteve coerente com os estudos de Barnett e Morse pelas décadas seguintes (KRAUTKRAEMER, 1998; TILTON, 1999), o que pode ser observado na Figura 15 que mostra o declínio dos preços de uma cesta de cinco metais e sete minerais industriais para todo o século XX, compilada pelo USGS (SULLIVAN, 2000).



Fonte: Sullivan, 2000

Figura 15 - Índice de preços composto pelo USGS para cinco *commodities* metálicas (cobre, ouro, minério de ferro, chumbo e zinco) e sete minerais industriais (cimento, argila, brita, cal, rocha fosfática, sal, areia e cascalho) em USD de 1997

Apesar do aumento da população e da industrialização em nível global, dois motivos para aumento da pressão de demanda, não parece haver escassez de recursos. Tietenberg (2009) identificou três fatores mitigantes da escassez: identificação de novas reservas por meio de exploração mineral, avanços tecnológicos e substituição. A exploração amplia a base de recursos e reservas identificados. O avanço tecnológico diminui os custos de mão de obra, energia e capital por unidade produzida, por meio de equipamentos e processos, e viabiliza acesso a recursos anteriormente inviáveis economicamente. A substituição ocorre quando o alto preço da *commodity* escassa passa a viabilizar tecnologias e materiais alternativos até então não econômicos.

Embora no longo prazo tenha-se observado uma diminuição na escassez das *commodities* minerais, no curto prazo a escassez pode se tornar problemática. Como discutido anteriormente, algumas imperfeições do mercado podem amplificar pequenos desequilíbrios de oferta e demanda e gerar situações extremas como a do caso do cobalto no fim da década de 1970, ilustrado na Figura 16.

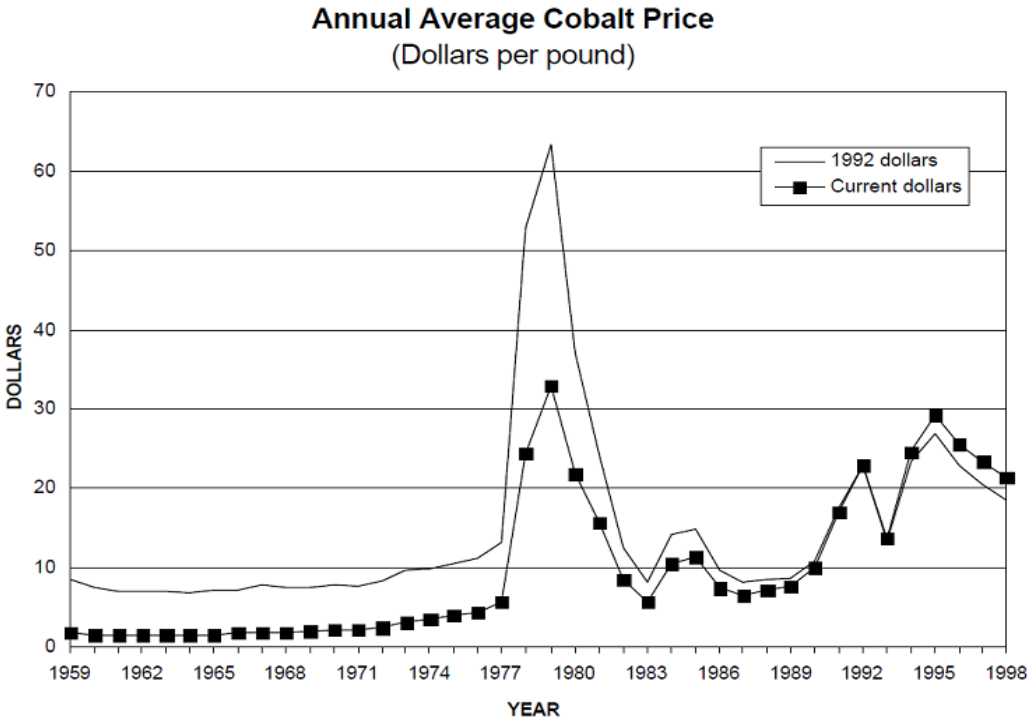


Figura 16 - Escassez de curto prazo - cobalto

À época, a demanda para o cobalto estava aumentando e uma sequência de eventos acabou por restringir sua oferta no mercado, a saber: os Estados Unidos suspenderam as vendas de seus estoques reguladores e o maior produtor mundial, o Zaire, que já estava com estoques baixos, entrou em um período de instabilidade política, diminuindo ainda mais a oferta (PLUNKERT, 1999). Ilustra-se a seguir como alguns dos fatores expostos se combinaram para causar a recente retração dos preços do níquel, a partir de 2011. Tem-se neste caso, no mínimo, os seguintes fatores agindo em conjunto:

- redução de demanda;
- redução de custos de produção;
- substituição;
- excesso de oferta.

Como se pode observar na Figura 17, a partir de fevereiro de 2011 até julho de 2013 o preço do níquel caiu de 29.065 USD/t para 13.310 USD/t, ou seja, uma queda de mais de 50%.

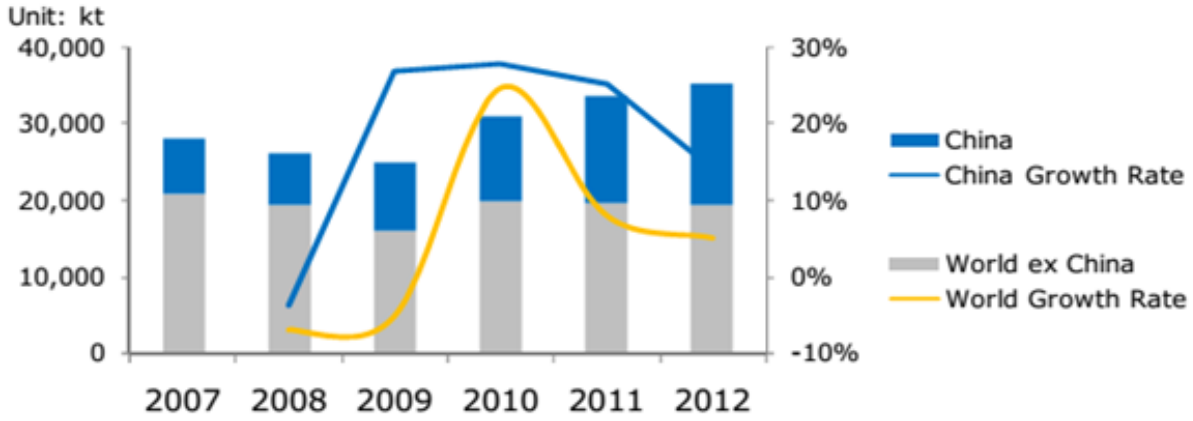
Os motivos que levaram a esta expressiva redução de preços envolvem basicamente a diminuição do ritmo de crescimento da produção de aço inoxidável na

China e sua consequente redução no crescimento da demanda do níquel, o excesso de oferta do metal, redução de custos na produção de NPI (Nickel Pig Iron - ferro gusa de níquel) e consequente substituição de outros produtos de níquel pelo NPI na produção de aço inoxidável.

Fonte: LME, SMM

Figura 17 - Queda acentuada do preço do níquel de fev/2011 a jul/2013

A produção de aço inoxidável da China responde por mais de 45% da produção mundial. Com a redução do crescimento da produção de aço inoxidável chinês, o crescimento da produção de aço inoxidável mundial caiu de 25% em 2010 para apenas 5% em 2012, como pode ser observado na Figura 18.

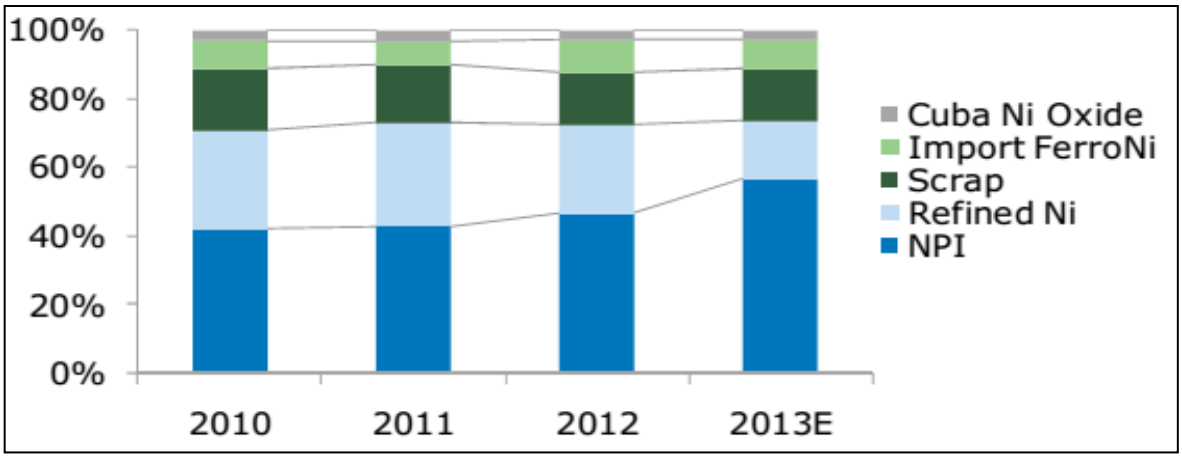


Fonte: ISSF, SMM

Figura 18 - Redução do crescimento da produção de aço inoxidável

A China se tornou a maior participante no crescimento mundial de produção de níquel primário em 2009, saindo de 5% em 2008 e chegando a mais de 20% em

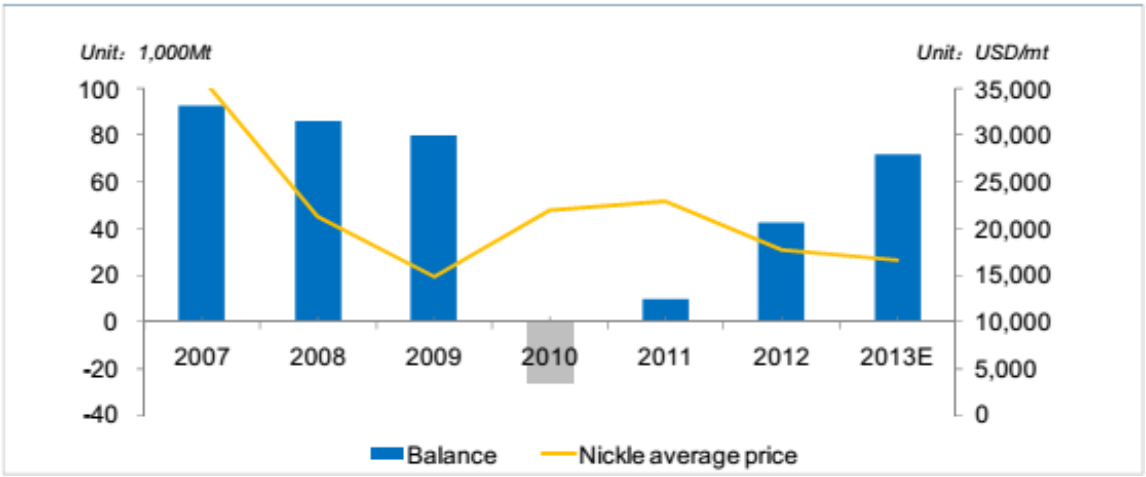
2013. Nos últimos anos, devido a vantagens de custo e disponibilidade na China, o NPI tem substituído outras fontes de níquel tais como níquel refinado, óxido de níquel e ferroníquel importado, entre outros, tornando-se responsável por mais de 50% do suprimento de níquel para fabricação do aço inoxidável chinês. A Figura 19 ilustra esta situação.



Fonte:SMM

Figura 19 - Fontes de níquel para produção de aço inoxidável na China

Devido à diminuição do crescimento da demanda e do rápido aumento da oferta causado pelo aumento da produção de NPI da China, o mercado ficou com excesso de oferta, o que causou uma aceleração no aumento dos estoques, que já vinham crescendo desde 2007, e a consequente redução dos preços do níquel, como se vê na Figura 20.



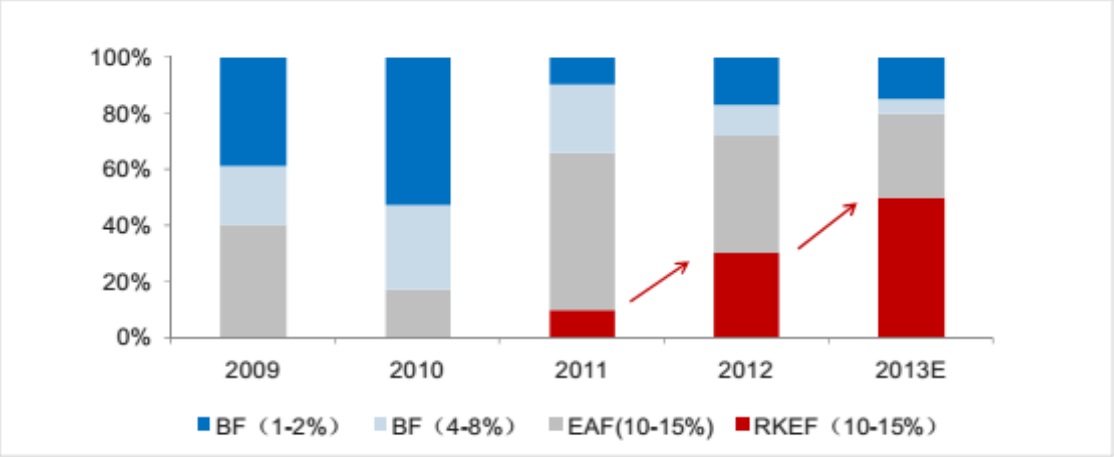
Fonte: INSG, SMM

Figura 20 - Excesso de níquel no mercado e seu preço na LME

A partir de 2011, o processo RKEF (Rotary Kiln - Electric Furnace) reduziu ainda mais os custos de produção do NPI em comparação com os processos então em uso: BF (Blast Furnace), EF (Electric Furnace) e EAF (Electric Arc Furnace). Como base de comparação, o consumo de energia elétrica em kWh por tonelada produzida de Ni é cerca de 40% menor no processo RKEF comparando-o aos consumos dos processos BF ou EF, o que equivale a uma redução de custos de mais de RMB 2.000/t (equivalentes a USD 310/t na taxa média de conversão de 2011). Além disto, as refinarias que usam o processo RKEF se encontram em locais próximos à costa, reduzindo os custos de logística no processamento de minério importado. Como resultado, a participação do processo RKEF na produção de NPI vem avançando e a previsão era de que no ano de 2013 deveria estar em cerca de 50% (

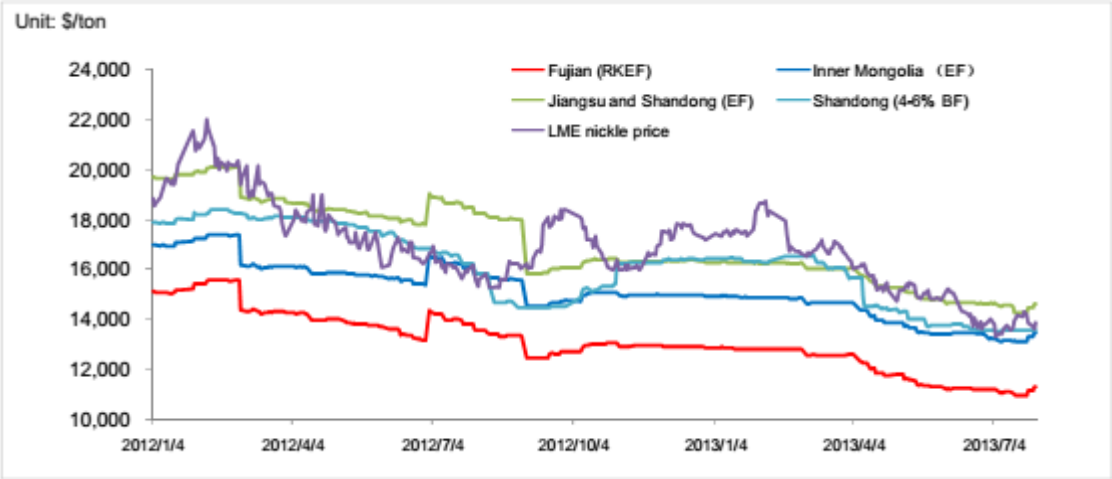
Figura 21), o que ainda não pôde ser confirmado pela indisponibilidade dos dados até o fechamento deste trabalho.

A Figura 22 mostra uma comparação dos custos de produção dos vários processos com o preço no níquel na LME, evidenciando a dificuldade das empresas que utilizam processos mais antigos em se manter operando economicamente para os níveis de preço praticados pela LME nos últimos anos.



Fonte:SMM

Figura 21 - Evolução da participação dos processos na produção de NPI



Fonte: SMM

Figura 22 - Comparação dos custos dos processos NPI e preço do níquel na LME

3.2.7 Modelagem

Segundo Chen (2012a) a literatura disponível sobre análise e modelagem dos preços de *commodities* minerais apresenta três grandes vertentes:

- a primeira argumenta que ao se procurar estabelecer as tendências de longo prazo das taxas de mudança de preços há questões importantes de mensuração a considerar, objetos de extensa controvérsia conforme documentado nas publicações compiladas no livro de Greenaway e Morgan (1999). Tais questões abrangem o excesso de volatilidade e o acoplamento dos preços das *commodities* (PINDYCK; ROTEMBERG, 1990), bem como a forma de deflacionar seus preços nominais para obter seus correspondentes preços reais;
- uma segunda vertente, exemplificada por Radetzki e Tilton (1990) e utilizada por Dompieri (2009), utiliza a abordagem de intensidade de uso (IOU) para analisar perspectivas futuras de consumo de *commodities*, particularmente as minerais. Tomando-se o consumo de aço de um determinado país como exemplo, sua relação com o dólar de PIB per capita apresenta-se normalmente em forma de arco, aumentando nos níveis mais baixos de renda, passando por um pico ao se desenvolver a infraestrutura e declinando a seguir conforme a economia amadurece e aumenta a influência do setor de serviços. Esta abordagem considera também que novas fontes de suprimento se fazem necessárias para satisfazer as demandas projetadas e

consequentemente os preços necessários para sustentar a respectiva capacidade de produção.

Uma terceira vertente da literatura analisa as interações entre os mercados de *commodities* e de moedas. Austrália, Brasil, Canadá, Noruega e uma série de países em desenvolvimento são os exportadores de *commodities*. Suas moedas tendem a se valorizar quando os mercados de *commodities* aquecem e a depreciar quando desaquecem, com notória regularidade. A taxa de câmbio é usada então como uma parte fundamental do mecanismo de ajuste nestes países e suas moedas são conhecidas como *currency commodities* ou divisas atreladas a *commodities*, por isso esta abordagem é conhecida como a teoria das *currency commodities*.

Todas as abordagens citadas buscam, em maior ou menor grau, compreender e antecipar o comportamento dos preços a médio e longo prazo, utilizando para tal fim análises de séries temporais dados históricos.

A proposta do presente trabalho visa, por outro lado, uma abordagem alternativa por meio da qual a análise das séries históricas e suas relações também são importantes mas não com objetivo de previsão (*forecast*), a que prazo for, e sim visando compreender a situação presente e seus riscos associados (*nowcast*). Desta forma buscou-se na literatura subsídios que auxiliassem na compreensão dos riscos sistêmicos (globais) e não sistêmicos (específicos de cada *commodity*) do mercado de *commodities*, sua estrutura interna e sua relação com seu ecossistema - a economia global.

No Anexo 1, exibe-se dados de preço e volume, bem como o logaritmo de suas variações, para 16 *commodities* minerais. Os dados utilizados de preços e volumes anuais para o período de 61 anos compreendido entre 1950 e 2010 foram obtidos do Serviço Geológico dos EUA (USGS). Estas *commodities* minerais são as mais economicamente significativas[6] segundo dados de 2010 do USGS. Os preços estão expressos em dólares norte-americanos por tonelada métrica e os volumes em toneladas métricas.

Para facilitar as comparações entre as *commodities* minerais usa-se a mesma escala na variação logarítmica dos preços e volumes. Estes gráficos revelam várias

[6] O termo "economicamente significativos" se refere ao produto do volume pelo preço de cada metal no ano de 2010.

particularidades. Em primeiro lugar, o volume tende a aumentar mais constantemente que o preço. Em outras palavras, os preços são geralmente mais voláteis que os volumes. Em segundo lugar, há uma tendência de maior volatilidade dos preços na segunda metade do período, padrão já anteriormente identificado por Chen (2010). Em terceiro lugar, no final do período (2010), os preços da maioria das *commodities* minerais chegaram a atingir seu máximo histórico ou ficaram perto dele.

Buscando compreender como os fatores anteriormente citados afetam os preços das *commodities* e sua volatilidade, Alquist e Coibion (2013) utilizaram modelos baseados em mistura de gaussianas (GMM), para identificar os fatores que os influenciam. Descobriu-se que o preço de cada *commodity* é afetado por uma estrutura que pode ser desmembrada em três componentes distintos. O primeiro componente engloba movimentos de preços específicos. O segundo componente capta choques que não são diretamente relacionados à oferta ou à demanda por *commodities* (como choques de produtividade agregada e choques de oferta de trabalho) o qual se denominou fator comum agregado indireto (CAI). O terceiro componente, denominado fator comum agregado direto (CAD), representa os choques que afetam diretamente a oferta e a demanda de *commodities*.

Utilizando esta decomposição, descobriu-se que o fator CAI é responsável por cerca de 60-70 % da variação nos preços globais reais das *commodities* e também por grande parte das alterações históricas dos preços das *commodities* desde o início dos anos 1970. No entanto, os choques diretos de *commodities* também desempenharam um papel não trivial na contabilização de alguns movimentos de preços de *commodities*, inclusive durante 1979-1980, no final de 1980, bem como na escalada dos preços das *commodities* na década de 2000 e seu posterior declínio em 2008 -2009. Mesmo assim, pode-se atribuir ao fator CAI uma participação que vai além da variação histórica dos preços das *commodities*. Ao se decompor as mudanças históricas na atividade econômica global, obtêm-se resultados semelhantes. Embora tenha havido períodos em que mudanças na atividade global tenham tido a contribuição de choques diretos (como em 1974-1975, ou durante a Grande Recessão de 2009), fica evidente que o CAI tem contribuído de forma muito mais intensa ao longo do histórico da atividade econômica global, mesmo nos períodos nos quais frequentemente se cita os choques de preços das *commodities*

(CAD) como fonte importante de volatilidade econômica, o que é consistente com a interpretação de Barsky e Kilian (2002).

Em sua publicação, embora não mencionem ou demonstrem casos de sucesso, os autores concluem que se pode usar o CAI associado aos preços correntes das *commodities* para ter algum grau de predição nos seus preços futuros, já que há um atraso entre a divulgação de notícias macroeconômicas e seu resultado nos preços.

Em Chen (2012b) os autores analisaram os preços de 21 *commodities* minerais significativamente econômicas e chegaram a três conclusões genéricas sobre seu comportamento global.

Em primeiro lugar, considera-se a o impacto de dois tipos de fatores na variação dos preços das *commodities* minerais:

(i) fatores globais comuns a todas as *commodities* minerais;

(ii) fatores específicos do mercado.

Os fatores globais abrangem, por exemplo, o crescimento mundial, liquidez e taxas de juros, enquanto os fatores específicos do mercado representam todos os demais. Como exemplos mais específicos de choque global pode-se citar uma desaceleração do crescimento da indústria chinesa de manufatura e de construção, que deprima globalmente a demanda de *commodities* minerais; a adesão dos bancos centrais a um alívio quantitativo (emissão de moeda) coordenado, levando a um aumento na liquidez global e consequentemente inflacionando os preços das *commodities*; ou ainda um aumento dos preços da energia que desacelere a economia mundial. Por outro lado, como exemplos de choques específicos do mercado, pode-se imaginar um avanço tecnológico que viabilize depósitos de minério que de outra forma seriam economicamente inviáveis; greves nos principais países fornecedores; desastres naturais interrompendo a produção das *commodities* minerais, entre outros.

Utilizando a média dos preços das *commodities* como referência para medir a influência dos fatores globais, ainda que os preços das *commodities* minerais pareçam ter um componente de fatores comuns, chegou-se à conclusão de que os fatores específicos são responsáveis por mais da metade da variabilidade dos preços. As Figuras 72 a 75 do Anexo 2 exibem os *scatter plots* dos logaritmos das

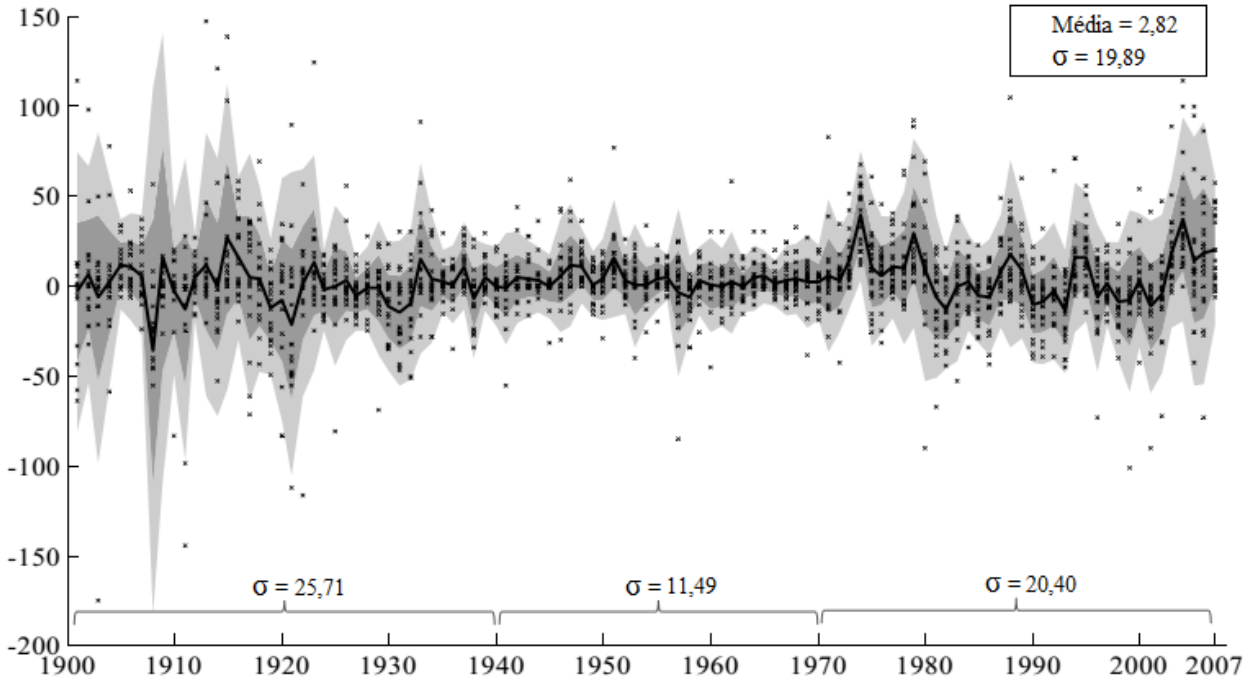
variações de preço de 21 *commodities* (Dp_{it}) minerais *versus* o logaritmo das variações de preço da média das 21 *commodities* (Dp_t). Após regressão linear múltipla, chega-se ao valor da participação dos fatores globais sobre a variação dos preços por meio da declividade da reta modelada, sendo que quanto maior a declividade, maior a participação dos fatores globais. Os resultados foram tabulados na Tabela 9 do mesmo Anexo 2. Destaca-se o risco global do níquel, calculado em cerca de 23%, comparando-o com o boro, que tem o menor risco global do grupo, menos de 1%, e com as *commodities* de maior exposição a riscos globais, o ferro[7], com 47% e o cobre com 45%. Verifica-se, por outro lado, que o componente de risco global é sempre menor que 50%, evidenciando-se assim a predominância dos fatores específicos.

Esta conclusão opõe-se diametralmente à de Alquist e Coibion (2013) e pode ser considerada surpreendente em face dos surtos ocorridos nos preços dos últimos anos. Os autores admitem que esta descoberta ainda careça de melhor avaliação, pois, em que pese a influência dos fatores específicos, a importância dos fatores globais vem aumentando ao longo das últimas quatro décadas. Convém acrescentar também que a adoção do regime de câmbio flutuante por vários países a partir da década de 1970, a volatilidade dos preços das *commodities* minerais aumentou, aumentando o impacto do fator global, como pode ser prontamente verificado no gráfico da Figura 23.

Os logaritmos das variações dos preços de 21 *commodities* foram plotados como pontos verticalmente alinhados a cada ano, juntamente com suas respectivas médias (linha preta sólida) e médias +/- n desvios padrão (faixa escura - 1 σ, faixa clara - 2 σ). Observa-se que os grupos anuais de 21 pontos tendem a se mover em sincronia para cima e para baixo. Este padrão revela que deve existir um fator comum na determinação dos preços. Curiosamente, há também uma tendência para uma maior dispersão dos preços quando ocorrem grandes variações no preço médio, em qualquer sentido, como se pode observar, por exemplo, em 1908, início dos anos 1930, no *boom* da década de 1970 e mais recentemente durante o *boom* do Milênio. Ainda não foram descobertos os motivos desta dependência que também tem sido observada na inflação e na literatura sobre preços relativos. Esta

[7] Embora haja controvérsias sobre o fato do Ferro ser ou não a rigor uma *commodity*, por não ser negociado em bolsa, esta aproximação está sendo utilizada neste estudo para efeito comparativo.

dependência será analisada sob a óptica da complexidade, pois em períodos de turbulência os valores de complexidade e entropia tendem a aumentar (Marczyk, 2009), o que poderia explicar a maior volatilidade associada aos períodos de maiores variações de preço.

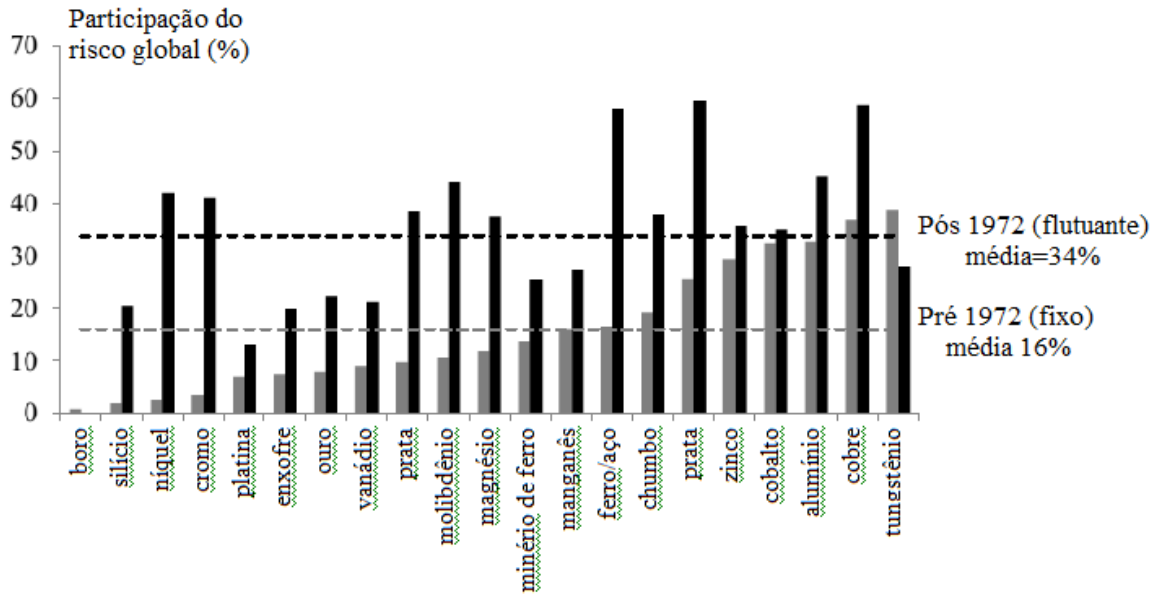


Fonte: CHEN, 2012b

Figura 23 - Variações de preço (log) de 21 *commodities*, de 1900 a 2007

Uma outra característica interessante é o comportamento peculiar dos preços em três períodos distintos: 1900-1940, 1941-1970 e 1971-2007. O primeiro e o último períodos têm dispersão de preço relativamente elevada[8], enquanto que no intermediário a dispersão é bem menor. Este período corresponde ao sistema de taxas de câmbio fixas de Bretton-Wood nos Estados Unidos, à época moeda de referência no comércio internacional. No primeiro período houve grandes choques associados à I Guerra Mundial e à Grande Depressão e também um período de taxas de câmbio flutuantes. No terceiro período, com as principais moedas em regime flutuante torna-se evidente a influência do regime de taxas de câmbio na volatilidade dos preços das *commodities*. Na Figura 24 pode-se observar claramente a diferença do risco global nos períodos de câmbio fixo (pré 1972) e flutuantes (pós 1972).

8 – σ é a média dos σ anuais no período considerado

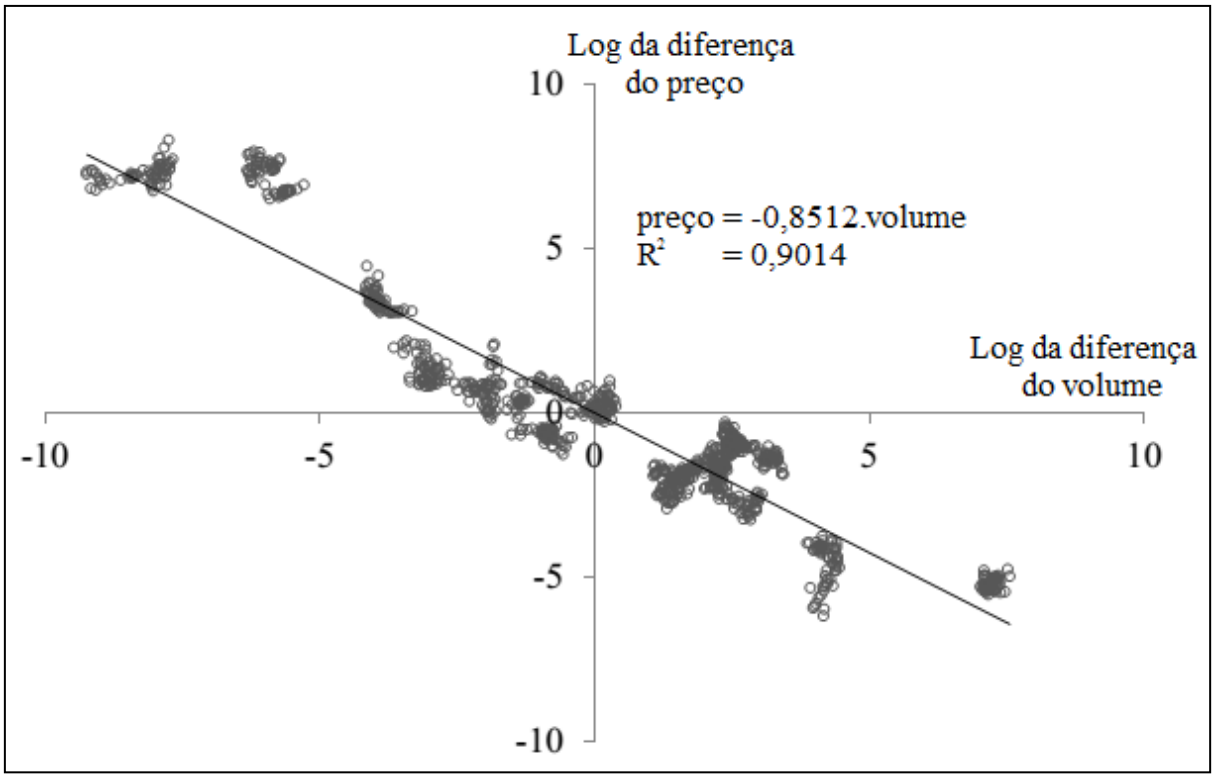


Fonte: CHEN, 2012b

Figura 24 - Risco global por *commodity* em função do regime de câmbio

Uma segunda conclusão confirma o resultado de pesquisas anteriormente publicadas que identificaram uma forte correlação negativa entre o preço de uma *commodity* mineral e seus respectivos volumes globais produzidos / consumidos no ano correspondente. Esta relação é intrigante, pois parece válida para uma grande variedade de *commodities* minerais desde as menos valiosas, como o concentrado de minério de ferro, até as mais nobres, como o ouro. A relação, também conhecida como ”Lei de Nutt”, segundo Nutting (1977), parece se sustentar por longos períodos. As forças econômicas envolvidas na relação ainda não foram completamente compreendidas, embora a substituição entre as *commodities* minerais pareça exercer um papel de destaque. A Fonte: CHEN, 2012b

Figura 25 exibe os logaritmos das diferenças entre preços e volumes e suas respectivas médias, para 16 *commodities* minerais, acumulados durante 61 anos, evidenciando de forma simples e eloquente esta relação entre preços e volumes.



Fonte: CHEN, 2012b

Figura 25 - Relação entre preços e volumes para 16 *commodities* minerais

Finalmente, os autores concluíram que os preços das *commodities* minerais apresentam ciclos de curto prazo bem definidos, que tendem a se repetir.

Mercados de *commodities* minerais são continuamente atingidos por choques de todos os tipos. Se a demanda for inelástica, estes choques terão grande influência nos preços no curto prazo. No longo prazo, em que a demanda é provavelmente mais elástica, o impacto nos preços será mais moderado. O impacto de choques de demanda sobre os preços depende da condição dos produtores de ativar/desativar capacidade produtiva. Como esta condição é mais limitada no curto prazo que no longo prazo (no qual se pode contar com a entrada de novas minas em produção, por exemplo), novamente a amplitude de oscilação dos preços é maior no curto prazo e menor no longo prazo. Com a recorrência de choques, não é improvável que haja uma tendência para a existência de padrões recorrentes também nos preços, ou seja, que exista um ciclo de preços.

Utilizando o índice de preços de uma cesta de *commodities* minerais importantes como resumo dos resultados, a fase de crescimento do ciclo tem duração de cerca de 24 meses em média, enquanto a de declínio é de cerca de 16

meses. Existe alguma dispersão desta duração entre as diferentes *commodities*. Na fase de crescimento os preços aumentam 50% em média, a maioria do que se perde na fase de declínio subsequente. Os preços tendem a mudar mais rapidamente em torno do pico e mais lentamente em torno dos vales. Assim, uma rápida aceleração dos preços pode indicar a iminência de um pico, enquanto uma moderação da queda de preços pode ser sinal de que o final de uma fase de baixa esteja próximo. Há evidências de comportamento semelhante na variação de preço de uma fase do ciclo para a fase seguinte. Um *boom* maior dos preços está associado a uma queda posterior maior. Não há indicações, no entanto, de que uma escalada (ou queda) mais longa seja seguida por uma queda (ou escalada) também mais longa. Na Figura 26 verifica-se o aspecto cíclico para o índice de metais não ferrosos, tendo o níquel em destaque. No eixo esquerdo lê-se o logaritmo das variações de preço e, no direito, o índice, no caso dos metais não ferrosos, ou os preços, no caso do níquel. As regiões em cinza destacam os períodos de baixa.

A periodicidade dos preços das *commodities* metálicas também foi detectada por outros autores como em Davutyan e Roberts (1994), Jerrett e Cuddington (2008) e IMF (2012). No caso do mercado de *commodities* este fato tem sido usado como crítica à Hipótese de Mercado Eficiente (HME) (Durlauf, 2008), já que inviabiliza a suposição, necessária à sustentação da HME, de que os preços de mercado variam de forma aleatória.

Além dos modelos mais genéricos de comportamento do mercado, como os vistos anteriormente, alguns autores buscam uma abordagem econométrica onde usam de grande rigor matemático/estatístico para tentar compreender, modelar e prever as variações de preços de curto e longo prazo no mercado de *commodities*. Issler et al. (2014) empregam técnicas e testes descritos na literatura sobre características comuns para construir VARs (Vetores Auto Regressivos) parcimoniosos e tentar descobrir relações semiestruturais entre preços de diferentes *commodities* ou entre o preço de uma *commodity* e seu potencial determinante de demanda. Estes VARs são posteriormente utilizados em modelos de previsão de preços, utilizando um grande número de modelos (*N large*) e um grande número de períodos (*T large*). São utilizadas então técnicas de combinação de previsões para otimizar os resultados. A abordagem utilizada é a de tendências comuns e ciclos comuns proposta por Engle e Kozicki (1993), Vahid e Engle (1993, 1997), Engle e

Issler (1995), Issler e Vahid (2001, 2006), Vahid e Issler (2002), Hecqet al. (2006) e Athanasopoulos et al. (2011). Nesta abordagem, uma série econômica pode ser decomposta em um componente de tendência geral e em um componente cíclico estacionário e ergódico.

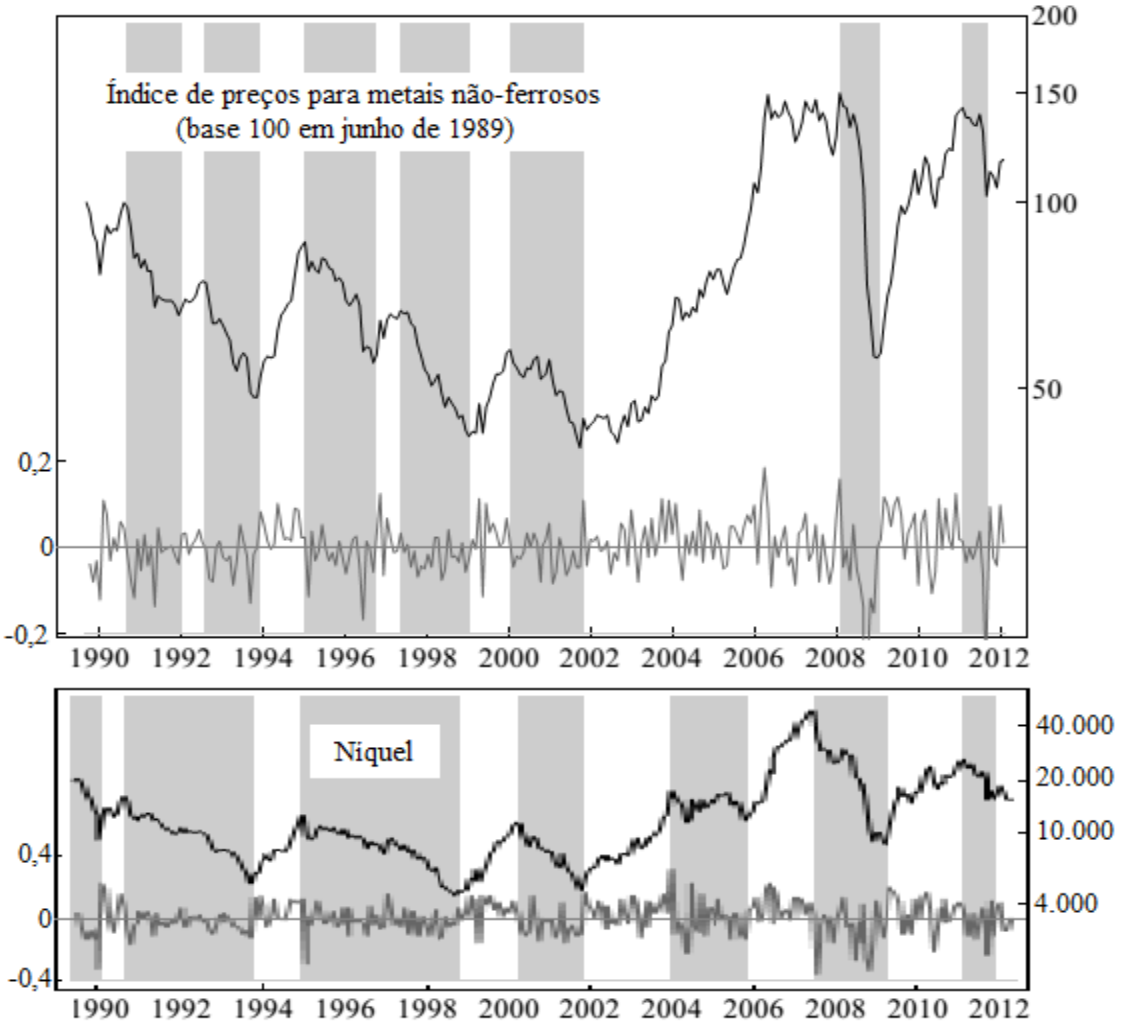


Figura 26 - Comportamento cíclico dos preços de metais não ferrosos com o níquel destacado no gráfico inferior

Depois de obtidos os VARs e tendo com eles construído um grande número de modelos, estes foram combinados por meio de várias técnicas buscando minimizar o valor quadrático médio do erro de previsão. As técnicas utilizadas foram: previsão corrigidas pelo viés (BCAF), previsão por média ponderada (WAF), previsão por média (AF), 5 melhores modelos e 10 melhores modelos. Os valores previstos por estas combinações, e também os previstos pelo melhor modelo individual selecionado pelo critério de informação bayesiano (BIC), podem ser vistos

na Figura 27 e na Figura 28, respectivamente para intervalos de previsão de 1 e de 6 períodos.

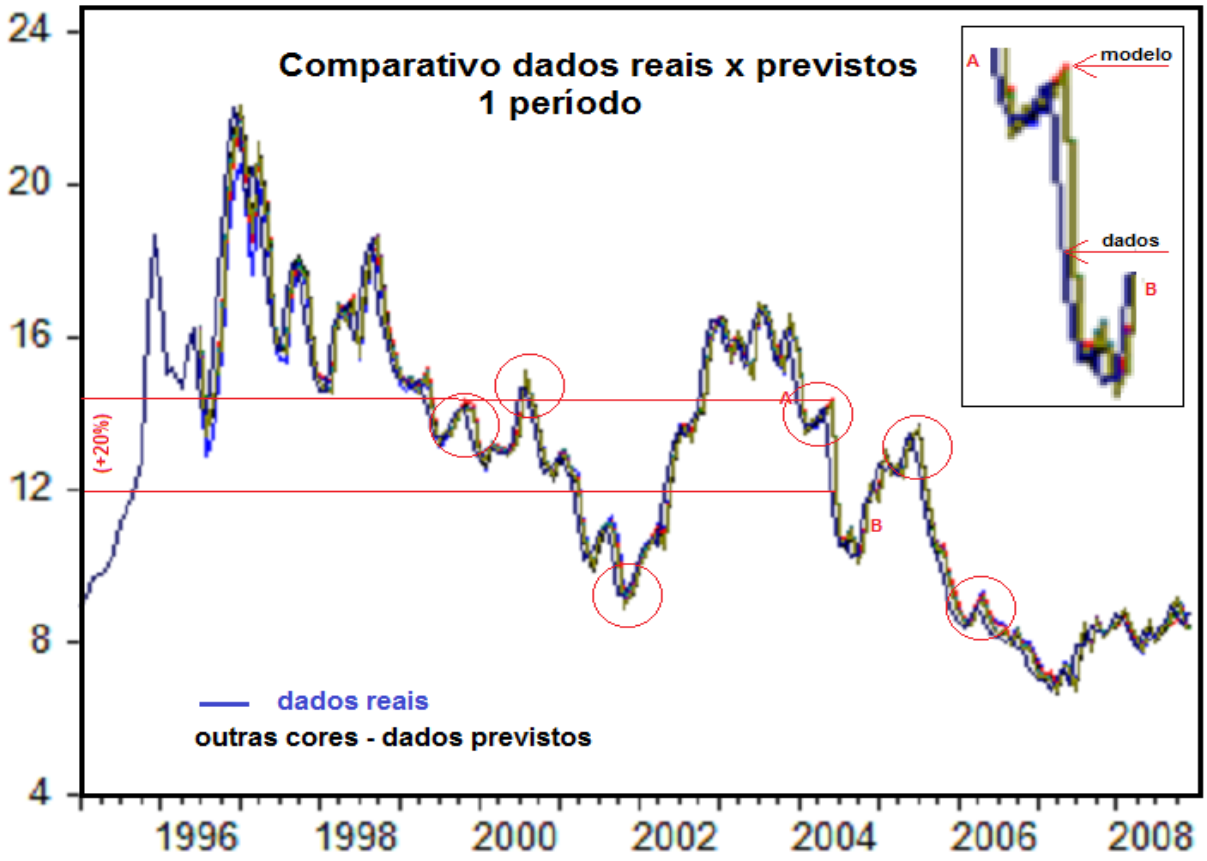


Figura 27 - Valores previstos pelos modelos x valores reais - 1 período

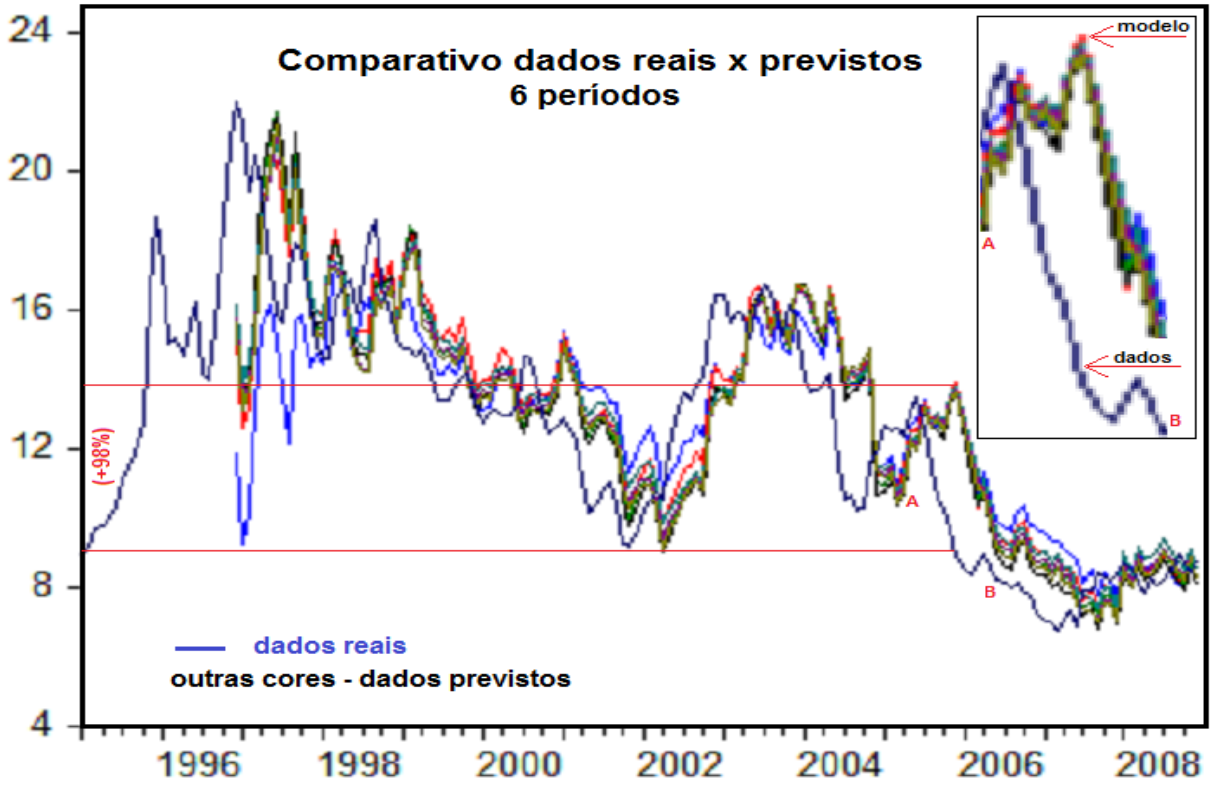


Figura 28 - Valores previstos pelos modelos x valores reais - 6 períodos

3.3 EVOLUÇÃO DA TECNOLOGIA DE EXTRAÇÃO METALÚRGICA DO NÍQUEL

3.3.1 Situação atual

Para os minérios de níquel sulfetados, a tecnologia é convencional e dominada há muito tempo, sem muitas variações qualquer que seja o tipo de minério. Já no caso dos minérios lateríticos, que constituem 60% das reservas mundiais atualmente conhecidas de cerca de 150 milhões de toneladas de Ni e tendência da maioria das reservas recentemente descobertas, muitas opções de rotas tecnológicas existem para utilização e a correta seleção e desenvolvimento das mesmas é o aspecto mais crítico e determinante do sucesso da extração do níquel. Contudo, a escolha do melhor processo a ser empregado em determinada usina depende em grande parte do minério a ser tratado, que requererá necessariamente uma criteriosa pesquisa básica de processo antes de se partir para o projeto de engenharia da usina industrial. Outros critérios, além do minério laterítico, devem ser contemplados e, em alguns casos chegam a ser determinantes, como, por exemplo, a disponibilidade de energia e seu custo, visto que os processos de tratamento de lateritas são, normalmente, intensivos em energia. A diferença

básica é que os minérios sulfetados são concentráveis por flotação e para os lateríticos ainda não houve sucesso na rota de beneficiamento físico. Desta forma, as massas de minério que precisam ser processadas para a mesma quantidade de metal são de outra ordem de grandeza.

A descrição dos processos para extração do níquel de seus minérios sulfetados e lateríticos é apresentada no Quadro 1.

Os aspectos ambientais também podem ser determinantes na seleção do processo, já que alguns processos têm forte impacto ambiental, o que pode vir a inviabilizar sua utilização em determinadas regiões.

Quadro 1 - Descrição dos processos para produção de níquel

MINÉRIO	Sulfetado	Laterítico			
PRODUTO FINAL	*Matte* de Ni e Ni metálico	Ni metálico	Ni metálico	*Matte* de Ni e Ni metálico	Liga Fe-Ni
ROTA	Pirometalúrgica	Hidrometalúrgica	Hidrometalúrgica	Pirometalúrgica	Pirometalúrgica
PROCESSO	Convencional	PAL (*Pressure Acid Leach*)	Lixiviação Amoniacal	*Ferro-Níquel Smelting*	*Ferro-Níquel Smelting*
	Concentração do minério para elevação do teor de Ni	Descarte de material de baixo teor			
			Britagem, moagem e desumidificação do minério	Britagem. Calcinação em fornos rotativos	Britagem. Calcinação em fornos rotativos
	Produção de calor por Oxidação do Enxofre (fornos)	Lixiviação com H_2SO_4 sob alta pressão e temperatura para obtenção dos sulfatos	Redução em fornos verticais	Fusão em fornos elétricos	Redução em fornos elétricos
	Formação de um *Matte* (sulfetos)	Precipitação seletiva de sulfetos	Resfriamento para solubilização dos metais por amônia obtendo-se aminas solúveis	Formação de um *Matte* utilizando-se de fonte de enxofre	
	Ataque com ácido para obtenção de sulfatos solúveis	Ataque com ácido para obtenção de sulfatos solúveis	Precipitação e Filtragem dos carbonatos de Ni e Co	Conversão do *Matte*	Refino para a eliminação de impurezas e obtenção da liga Fe-Ni
	Extração por solvente (SX) do Co e Ni				
	Eletrólise para obtenção de catodo de Ni e de Co				

Fonte BNDES

Em linhas gerais, os minérios lateríticos são classificados basicamente em função da composição dos teores de níquel, ferro, magnésio e cobalto, e dependendo dela é selecionado o processo mais adequado para a obtenção do níquel, seja sob a forma de metal, seja sob a de liga Fe-Ni. O Quadro 2 apresenta a classificação conjugada com o processo selecionado para cada classe.

Quadro 2 - Seleção do processo para produção de níquel conforme classificação do minério laterítico

CLASSIFICAÇÃO DO MINÉRIO LATERÍTICO						
COMPOSIÇÃO	CLASSE 1	CLASSE 2	CLASSE 3		CLASSE 4	CLASSE 5
Ni (%)	1,2	1,5	1,7		1,6	1,7
Fe (%)	> 38	17 - 38	10 - 17		< 10	< 11
Mg (%)	1	5	12		16	18
Co (%)	> 0,1	0,07 - 0,1	0,03 - 0,1		< 0,03	< 0,03
SELEÇÃO DO PROCESSO PARA PRODUÇÃO DE NÍQUEL						
PRODUTO FINAL	Ni metálico	Ni metálico	Ni metálico	Liga Fe-Ni	Liga Fe-Ni	Liga Fe-Ni
ROTA	Hidrometalúrgica	Hidrometalúrgica	Hidrometalúrgica	Pirometalúrgica	Pirometalúrgica	Pirometalúrgica
PROCESSO	PAL (*Pressure Acid Leach*) complementada por Extração por solvente (SX) e Eletrólise	Lixiviação Amoniacal ou PAL complementada por Extração por solvente (SX) e Eletrólise	Lixiviação Amoniacal complementada por Extração por solvente (SX) e Eletrólise	*Ferro-Níquel Smelting*	*Ferro-Níquel Smelting*	*Ferro-Níquel Smelting*

Fonte BNDES

Outro critério muito importante é a composição dos minerais de ganga. A Figura 29 define a aptidão do minério para ser tratado via lixiviação ácida (terço superior) devido ao excesso de energia necessária para fundir as significativas quantidades de escorificante (cal ou dolomita) necessárias, amoniacal (terço inferior) pelo mesmo motivo (SiO_2 como escorificante, neste caso) ou para produção de ferroníquel (terço central) caso em que as gangas ácidas e alcalinas se equilibram, viabilizando a pirometalurgia do ferroníquel.

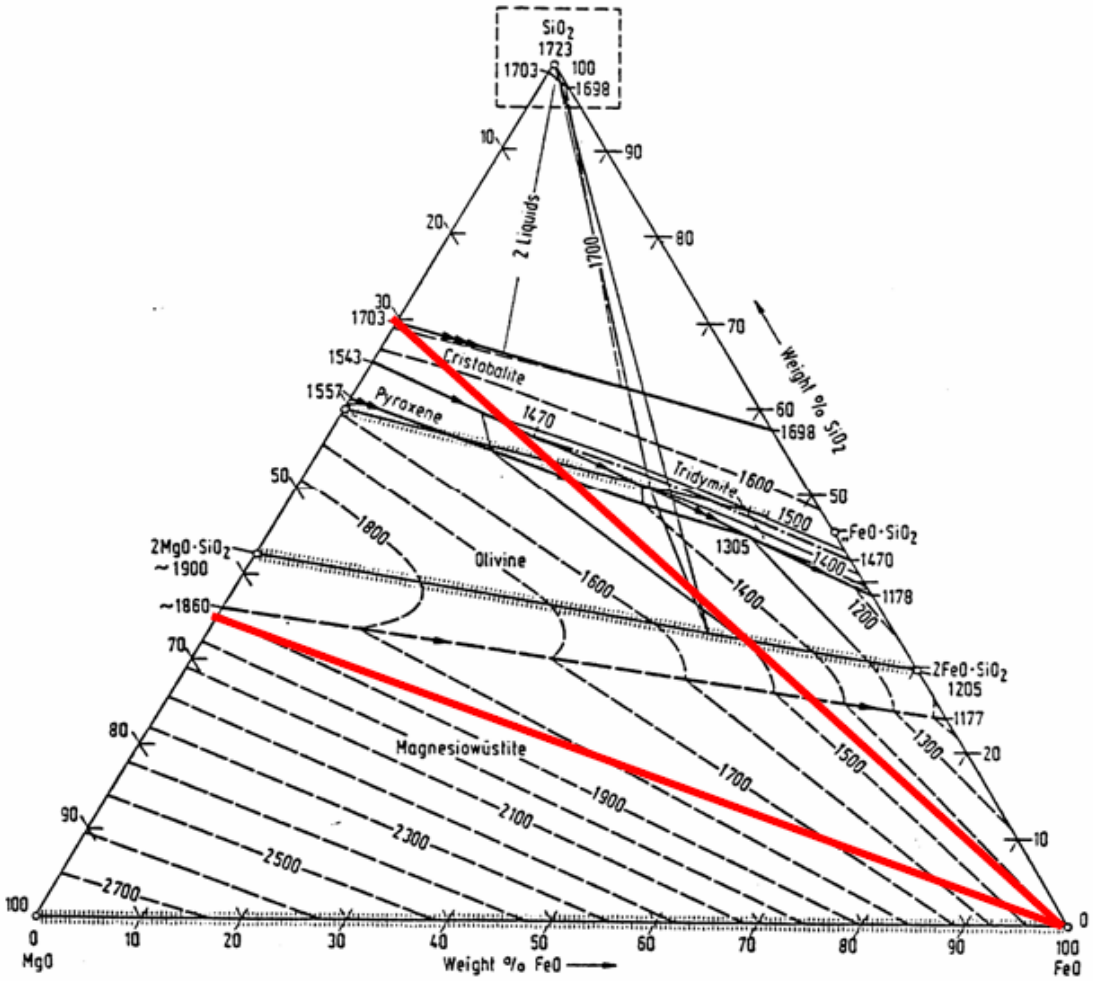


Figura 29 - Diagrama de fases SiO_2-MgO-FeO

Para viabilizar minérios de teores inferiores a 1,2% Ni, associados a altos teores de Fe e Mg, vem sendo desenvolvida uma outra tecnologia, a HPAL (High Pressure Acid Leaching) que ainda atualmente não está totalmente madura e enfrenta desafios técnicos, de engenharia, de alto consumo de energia e de várias outras ordens. Um exemplo disto é o alto custo das autoclaves de titânio necessárias ao processo.

Na síntese das tecnologias empregadas no país para a produção de metal e de liga Fe-Ni, apresentada no Quadro 3, identifica-se seu uso apenas no projeto “níquel do Vermelho” da Vale.

Quadro 3 - Processos de produção de níquel no Brasil

	EMPRESAS						
	Votorantim (Fortaleza de Minas)	Votorantim (Niquelândia/São Miguel Paulista)	Votorantim (Niquelândia)*	Anglo American (Niquelândia)	Anglo American (Barro Alto)*	Vale Inco (Onça–Puma)*	Vale Inco (Vermelho)*
MINÉRIO	Sulfetado	Laterítico					
PRODUTO FINAL	*Matte* de Ni	Ni eletrolítico	Liga Fe–Ni	Liga Fe–Ni	Liga Fe–Ni	Liga Fe–Ni	Ni Eletrolítico
ROTA	Pirometalúrgica	Hidrometalúrgica	Pirometalúrgica	Pirometalúrgica	Pirometalúrgica	Pirometalúrgica	Hidrometalúrgica
PROCESSO	Convencional	Lixiviação Amoniacal / Extração por Solvente/ Eletrólise	*Ferro–Níquel Smelting*	*Ferro–Níquel Smelting*	*Ferro–Níquel Smelting*	*RKEF (Rotary Kiln Electric Furnace***)	*High Pressure Acid Leach (HPAL)*

Fonte: Vale – site institucional; Anglo American – site institucional, Votorantim – site institucional

**Projeto em implantação. ** Processo convenciona,l consistindo de calcinação pré–redutora do minério, seguida de sua fusão (em forno elétrico) e smelting.*

Como se observa na apresentação da Vale para o projeto “níquel do Vermelho”, até 1999 o projeto era considerado de baixa atratividade pois estava sendo considerada a rota pirometalúrgica. Até então, o processo HPAL era usado apenas na mina de Moa Bay, em Cuba, e não havia informações disponíveis sobre o mesmo. Apenas a partir de 1999 a tecnologia, que foi implementada em 3 usinas na Austrália e tornou-se então licenciável, ficou disponível para utilização por outras empresas

Ainda assim, a Vale precisou de quase cinco anos de desenvolvimento do processo no “níquel do Vermelho”, empregando uma equipe internacional de larga experiência em HPAL, pessoal próprio e empresas especializadas, para que se chegasse a uma rota de refino adequada, em termos de processo, estabilidade operacional, meio ambiente, segurança e saúde ocupacional, como pode ser observado em Brasil Mineral (2007a).

Cita-se a seguir dois casos importantes na indústria de extração do níquel em depósitos lateríticos, exemplificando as dificuldades deste tipo de empreendimento:

1) Mina de Goro, da Vale (Nova Caledônia - território francês)

Em 21/04/2010, a agência noticiosa Reuters dá conta de que o projeto de USD 4,3 Bi que deveria ter entrado em operação em janeiro/2010 ainda não o havia iniciado devido a problemas na fase de comissionamento, que já vinha se estendendo havia um ano e meio. O último problema havia sido causado por uma autoclave utilizada no processo HPAL (REUTERS, 2010);

2) Mina de Ravensthorpe, recém vendida pela BHP Billiton à First Quantum Minerals (Austrália)

Após investir USD3,6 Bi, a BHP Billiton vendeu o empreendimento por USD 340M à First Quantum, que ainda previa aportar mais USD150M em reformas na problemática usina de tratamento ao longo de um ano, após o que deveria ainda gastar mais 6 meses no comissionamento (COURIERMAIL, 2009).

3.3.2 Novas tecnologias

Em função de sua diversidade e dos desafios que apresentam, os minérios lateríticos ainda carecem de soluções mais eficazes de extração metalúrgica que continuam a ser pesquisadas.

Ao longo da última década, houve um considerável esforço de desenvolvimento para procurar superar os custos e as limitações de confiabilidade dos processos a alta pressão (HPAL) por meio do desenvolvimento de processos a baixas pressões ou a pressão atmosférica (lixiviação em pilhas ou em tanques agitados) e de rotas integradas que regenerem o agente lixiviante e permitam produzir co-produtos de forma rentável. Grandes avanços foram realizados no sentido de se criar processos alternativos de recuperação do níquel, particularmente via extração direta por solventes (DSX -Direct Solvent Extraction).

Apresenta-se a seguir alguns dos desenvolvimentos correntes, dentro das abordagens hidrometalúrgica e pirometalúrgica, extraídos das publicações de Kyle (2010), Willys (2012) e Dry e Harris (2012).

3.3.2.1 Hidrometalurgia

Dentro do universo hidrometalúrgico de lixiviação ácida, novos processos se encontram em desenvolvimento utilizando os ácidos sulfúrico, clorídrico, nítrico e também ácidos orgânicos (biolixiviação).

Dentre os processos em desenvolvimento que utilizam o ácido sulfúrico pode-se citar:

- lixiviação ácida sob pressão (PAL - *Pressure Acid Leaching*) combinada com lixiviação em tanques agitados à pressão atmosférica (AL - *pressure Agitated tank Leaching*);
- lixiviação em tanques agitados à pressão atmosférica autossuficientes (AL);

- lixiviação em pilhas (HL - *Heap Leaching)*.

O processo PAL+AL combina o processo PAL para a limonita com o processo AL para o saprolito em um circuito paralelo e/ou usa o saprolito para neutralizar o resíduo ácido do processo PAL. Vários projetos piloto têm sido implementados desde a década de 1970 mas, com exceção do processo EPAL, desenvolvido pela BHP Billiton e instalado em Ravensthorpe na Austrália (Figura 30), ainda não obteve sucesso comercial.

Os objetivos principais desta combinação são:

- tratar todo o minério de depósito;
- reduzir o consumo específico de ácido do saprolito;
- eliminar ou reduzir o consumo de calcário para neutralização do ácido residual do processo PAL da limonita;
- reduzir o CAPEX.

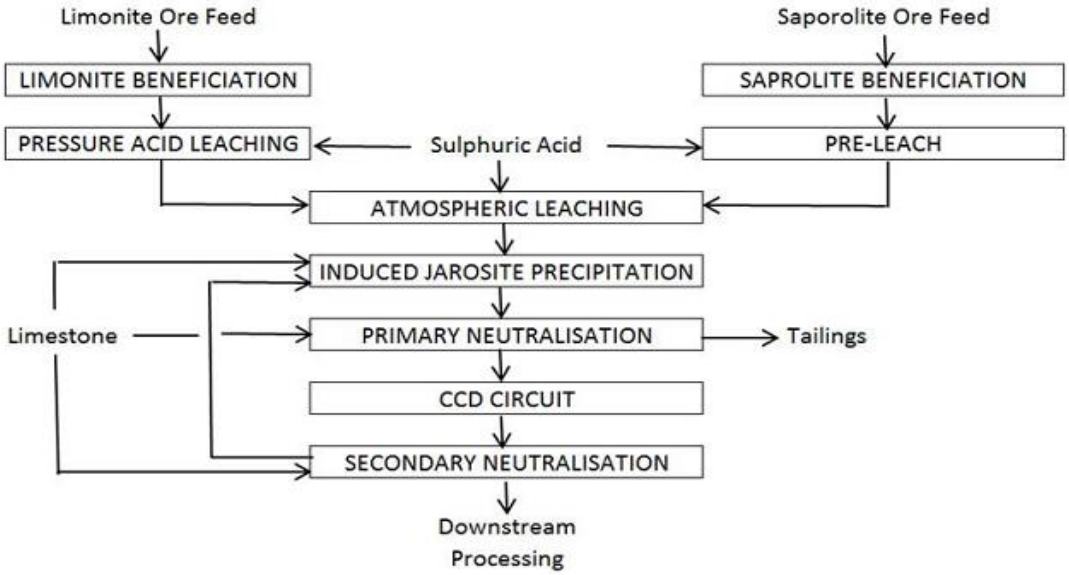


Figura 30 - Fluxograma do processo EPAL (PAL +AL) instalado em Ravensthorpe

A vantagem do processo AL autossuficiente é a ausência do processo PAL que se traduz em menores investimentos, menos horas improdutivas e menores custos de manutenção. Por outro lado, esta economia pode ser neutralizada por um maior consumo de ácido sulfúrico que inclusive leva maiores teores de ferro e de outros contaminantes a seguir para os processos subsequentes.

Outras desvantagens do processo são a eficiência mais baixa para lixiviação do minério limonítico, a possível necessidade de injeção de SO2 para obter uma alta recuperação de cobalto e o alto custo dos materiais utilizados para suportar a alta temperatura de operação próxima a 100°C. O AL autossuficiente já foi testado por algumas empresas, sendo a Eramet um exemplo recente que o adotou para o projeto Weda Bay na Indonésia (Figura 31).

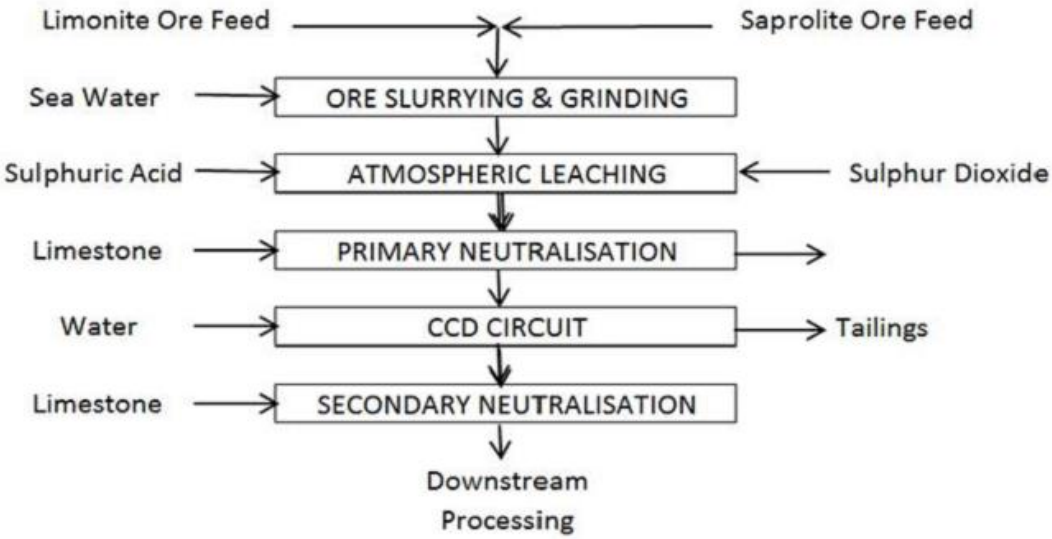


Figura 31- Fluxograma do processo AL autossuficiente em Weda Bay, Indonésia

Várias empresas vêm experimentando o processo de lixiviação em pilhas (HL) desde 1990 mas ainda não há nenhuma instalação em operação comercial autossuficiente. Como exemplos pode-se citar a mina de Murrin Murrin na Austrália, na qual se chegou à conclusão que o processo PAL ainda é mais econômico que o HL e a mina de Caldag, na Turquia (Figura 32), ainda em fase experimental. Os principais problemas com a lixiviação em pilhas é que as lateritas normalmente produzem uma grande quantidade de finos na cominuição tornando necessário um processo de aglomeração com polímeros. O processo é problemático em locais com altos níveis de precipitação pluviométrica devido a problemas de estabilidade das pilhas, desagregação dos aglomerados e diluição da solução lixiviante. Além disto, a recuperação em minérios limoníticos é baixa, apresenta um alto consumo de ácido, principalmente com minério saprolítico, negando assim as vantagens econômicas sobre o processo PAL, e gera altos teores de ferro e de outros contaminantes para

os processos a jusante. Em termos ambientais, pode haver problemas de descomissionamento principalmente em locais de alta precipitação pluviométrica.

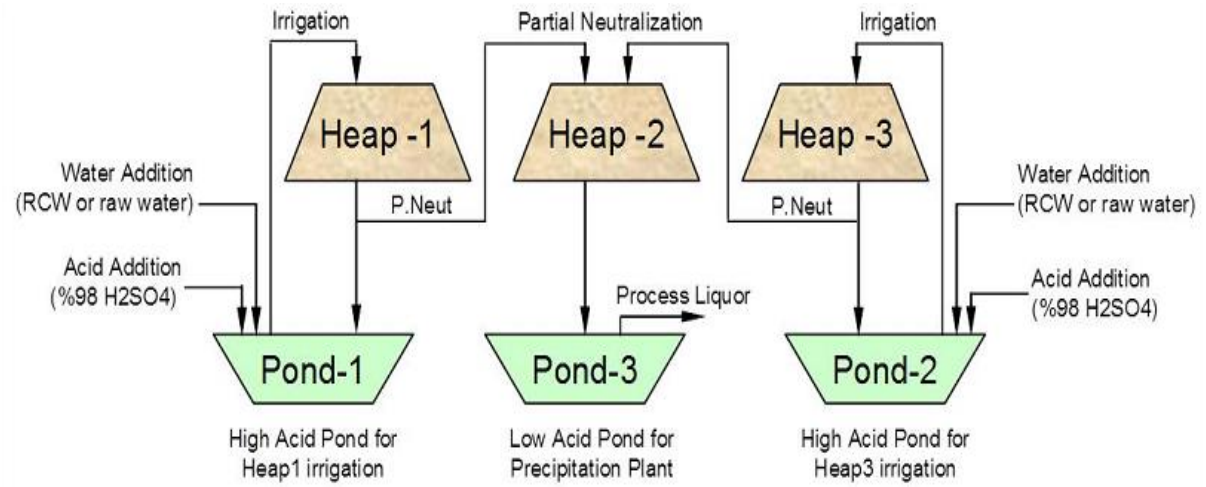


Figura 32 - Fluxograma do processo HL instalado na mina de Caldag, Turquia

Resume-se a seguir as principais vantagens dos processos baseados em lixiviação com ácido sulfúrico.

<u>Vantagens:</u>

- é o reagente de lixiviação mais conhecido e mais comumente utilizado na indústria de mineração e metalurgia;
- é amplamente disponível a um custo moderado;
- frequentemente produz-se na própria indústria, como em refinarias por exemplo;
- a produção no local pode gerar energia.

<u>Desvantagens:</u>

- o processamento a jusante é tipicamente complexo, tornando-se um dos principais componentes do custo global de capital, especialmente se for necessário separar o níquel e o cobalto no local;
- a solução de lixiviação geralmente carrega baixos teores de níquel e de cobalto, o que afeta negativamente os custos operacionais e de capital;
- o ácido não é regenerado ou reciclado.

O ácido clorídrico já foi testado por algumas empresas em processos de lixiviação para lateritas. Os exemplos recentes são a Neomet (Figura 33), a Nichromet e a Process Research, todas no Canadá, a Anglo Research na África do

Sul, e a SMS Siemag na Áustria. Ainda não existem usinas comerciais operando, no entanto, há algumas operações comerciais já antigas utilizando o ácido clorídrico no refino do *matte* de níquel.

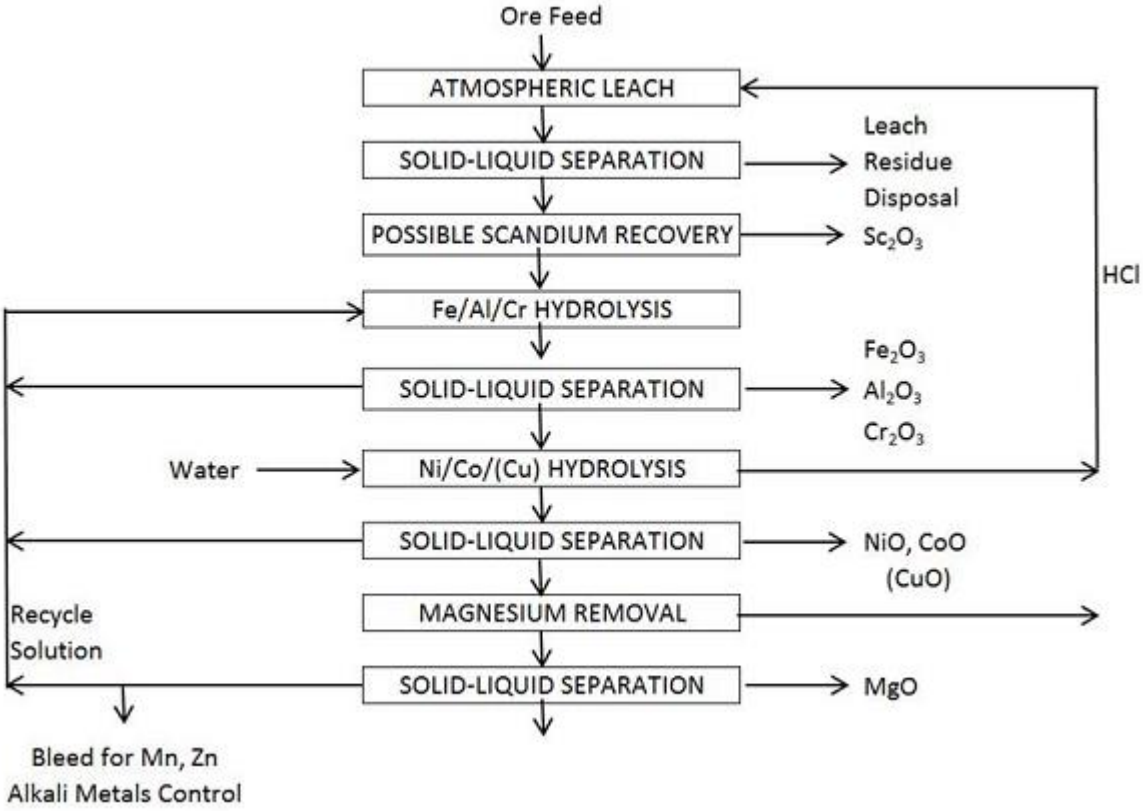


Figura 33 - Fluxograma do processo de lixiviação com HCl da Neomet, Canadá

<u>Vantagens potenciais:</u>

- a lixiviação utiliza tanques agitados à pressão atmosférica;
- é aplicável tanto a minérios limoníticos quanto a saprolíticos;
- os custos operacionais e de capital são menores que o do PAL;
- as recuperações de níquel e de cobalto são elevadas;
- o agente lixiviante é regenerado e reciclado;
- a separação e recuperação do níquel e do cobalto é relativamente simples e existem métodos comercialmente viáveis para tal;
- não é necessário neutralização secundária para remover o ferro residual;
- Há possibilidade de se recuperar outros subprodutos.

<u>Desvantagens:</u>

- Soluções de ácido clorídrico são altamente corrosivas, especialmente a altas temperaturas;
- O tratamento de vapores de HCl envolve questões de segurança do trabalho;
- Dependendo da configuração do circuito de água, pode haver problemas decorrentes da liberação de soluções de cloretos no ambiente.

Sistemas de lixiviação para minério de níquel laterítico que utilizam ácido nítrico têm tradicionalmente despertado pouco interesse na indústria. Um exemplo recente é o Processo DNi (Figura 34) que está sendo desenvolvido pela Direct Nickel na Austrália Ocidental. Ainda não existem plantas comerciais no caso do níquel, embora haja sistemas que utilizam ácido nítrico em outras aplicações de lixiviação e refino.

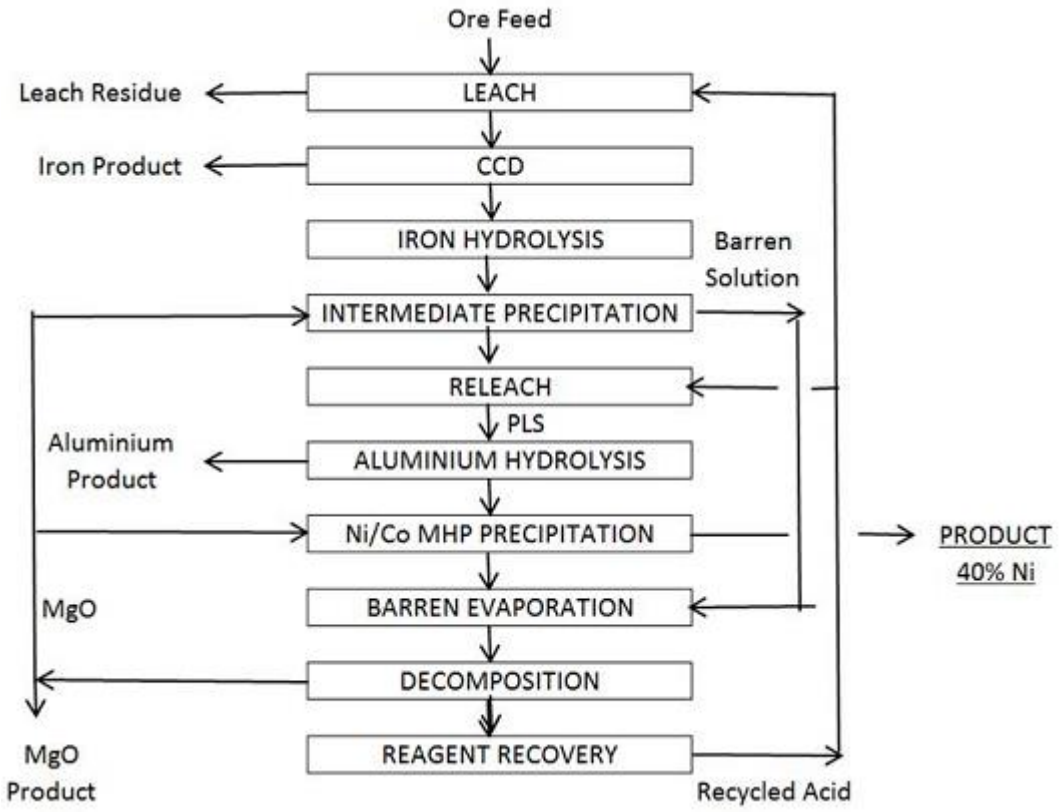


Figura 34 - Fluxograma do processo DNi da Direct Nickel, Austrália

<u>Vantagens potenciais:</u>

- a lixiviação utiliza tanques agitados à pressão atmosférica;
- é aplicável tanto a minérios limoníticos quanto a saprolíticos;

- os custos operacionais e de capital são menores que o do PAL;
- as recuperações de níquel e de cobalto são elevadas;
- o agente lixiviante é regenerado e reciclado;
- não é necessário neutralização secundária para remover o ferro residual;
- há possibilidade de se recuperar outros subprodutos.

Desvantagens:

- soluções de ácido nítrico são corrosivas mas menos do que soluções de ácido clorídrico; aços inoxidáveis dos tipos 304 e 316, por exemplo, são normalmente adequados a esta aplicação;
- o tratamento dos vapores envolve questões de segurança do trabalho;
- dependendo da configuração do circuito de água, pode haver problemas decorrentes da liberação de soluções de nitratos no ambiente.

Finalmente, ainda dentro do universo da hidrometalurgia mas não mais utilizando ácidos minerais como agente lixiviante, a biolixiviação se apresenta como uma alternativa mais limpa e ambientalmente segura que as tecnologias tradicionais. Esta tecnologia, ainda em seus estágios iniciais de desenvolvimento, baseia-se na utilização de ácidos gerados *in situ* por matéria orgânica. Valix et al. (2001a) considera a seletividade, obtida pelo desenvolvimento de agentes lixiviantes específicos para o níquel e o cobalto, uma das vantagens da tecnologia.

Experimentos iniciais desenvolvidos por Bosecker (1986) e Tzeferis e Agatzini-Leonardou (1994) indicaram boa seletividade para o níquel com ácido cítrico a 0,5M em minérios silicatados, com recuperação de até 90% do níquel contido.

As dificuldades que se apresentam para viabilizar o processo de biolixiviação são principalmente a recuperação do níquel e do cobalto da solução e também a seleção de uma fonte econômica de carbono orgânico para alimentar os micro-organismos que geram os ácidos.

3.3.2.2 Pirometalurgia

Devido aos altos preços alcançados pelo níquel em meados da década de 2000, os chineses passaram a desenvolver processos pirometalúrgicos para o tratamento de minérios lateríticos, disponíveis em grande quantidade e a baixos custos na Indonésia e nas Filipinas, para obter produtos de níquel que pudessem ser utilizados na fabricação do aço inoxidável e evitar as etapas tradicionais de *smelting*, obtendo assim uma economia global neste ciclo. Estes produtos são genericamente denominados NBM (*Nickel Base* Materials) e podem ser utilizados diretamente na fabricação de aços inoxidáveis se seus teores de níquel se encontram entre 6% e 13%. Para aços inoxidáveis da série 300 como, por exemplo, os produtos 1Cr18Ni5Mn8N e 0Cr21Ni6Mn9N, o teor de Ni deve estar entre 6% e 9% Descreve-se a seguir dois destes processos que, apesar de ainda estarem em aperfeiçoamento, vem obtendo grande sucesso comercial, com crescimento de produção exponencial a partir de 2008.

O processo RKEF (Rotary Kiln - Electric Furnace), foi concebido para minérios com alto teor de umidade. O primeiro estágio do processo remove a umidade livre e a água molecular, normalmente correspondentes a 30% a 45% da massa total do minério. Secadores rotativos de fluxo paralelo, geralmente à temperatura de 250°C, reduzem a umidade para 15% a 20%. A seguir, fornos rotativos em contra-corrente a 800-900°C, desidroxilam e calcinam/reduzem ou ainda sulfetam o minério, pré-condicionando o material antes do *smelting* em forno elétrico de arco a 1.600°C. O *smelting* produz ou ferroníquel, através da redução seletiva da fase óxido de níquel, ou *matte*, via condições sulfetantes. Das operações de *smelting* de laterita, 90% produzem ferroníquel, enquanto 10% produzem *matte* de níquel (CRUNDWELL et al, 2011). Os teores de níquel dos produtos variam entre 9% a 15% (alto grau). A recuperação de níquel e de cobalto no processo RKEF é de 90% a 95% e 50%, respectivamente. Embora as recuperações sejam altas, é alta também a energia específica consumida pelo processo, já que se emprega tanto energia fóssil de hidrocarbonetos quanto energia elétrica. O alto volume processado, resultante da alimentação do minério de baixo teor sem pré-concentração, eleva os custos de energia e de material.

A produção de ferro gusa de níquel (NPI) a partir de minérios lateríticos começou em 2006/ 2007 na China, devido aos preços extremamente elevados do

níquel na LME à época (CARTMAN, 2012). Utilizando altos-fornos de ferro modificados e fornos de arco elétrico produz-se ferroníquel de baixo grau (10% a 15% de Ni), empregado como alternativa ao níquel da LME para a produção de aço inoxidável. A produção de NPI segue as práticas tradicionais dos altos-fornos para minério de ferro, exigindo assim um investimento mínimo em modificações e, portanto, apresentando uma alternativa mais econômica à viabilização de projetos *greenfield* de lateritas. Limonita e lateritas transicionais são preferencialmente utilizadas como alimentação para a produção de NPI, pois o minério saprolítico produz grandes volumes de escória. A China é o maior importador de níquel para produção de aço inoxidável, sendo que a partir de 2010 o NPI tornou-se responsável por 30 % do consumo de níquel primário da China (CARTMAN, 2012). O níquel produzido pelo processo NPI é considerado "sujo", pois resulta em produtos de baixa qualidade e implica em geração de grandes volumes de escória, alto consumo de energia e polui o meio ambiente (YOUPING; YUSHENG; ZHAOYI, 2008). Por outro lado, as operações existentes estão sofrendo melhoramentos e novos aumentos de capacidade de produção estão em consideração.

Como se percebe, a tecnologia de extração metalúrgica para o minério laterítico é complexa, está em constante desenvolvimento e ainda não há uma solução definitiva para os problemas de corrosão, com suas consequências econômicas e ambientais, e de aplicabilidade aos dois tipos básicos de minério, o limonítico e o laterítico.

3.4 AVALIAÇÃO DA VIABILIDADE ECONÔMICA DO EMPREENDIMENTO MINERAL

3.4.1 Riscos e Incertezas

Na avaliação da viabilidade de um empreendimento mineral específico, o conceito de custo de oportunidade do capital, isto é, quanto a segunda alternativa mais rentável de investimento remunera o investidor pelo seu capital, tem fundamental importância. Pode-se considerar, por exemplo, o rendimento sem risco de Letras do Tesouro Nacional, que para efeito deste exercício suporemos remunerar o capital investido em 6% ao ano. Neste caso, o empreendimento considerado deve remunerar, além do custo de oportunidade, um “prêmio de risco”, por todo o trabalho e o risco envolvido em sua execução para que seja atrativo, ou seja, algo bem superior aos 6% ao ano (todos os valores já descontados da inflação). De outra forma, opta-se pela segunda alternativa e desconsidera-se o empreendimento, por ser financeiramente inviável.

Os investimentos minerais têm uma série de características peculiares que os tornam diferentes de outros tipos de investimentos, a saber: reservas exauríveis, características particulares da reserva de minério, características e localização particulares dos depósitos, existência de incertezas geológicas, o longo tempo requerido na implantação dos projetos, a longa vida da operação em si e a natureza pronunciadamente cíclica dos preços dos minerais. Além disto, os depósitos devem ser lavrados onde são encontrados, muitas vezes exigindo soluções de infraestrutura e logística que podem vir a inviabilizar o projeto, ao passo que outros tipos de atividades industriais têm maior flexibilidade na escolha de sua localização.

A característica cíclica dos preços dos minerais e os longos prazos de implantação e operação impõem grandes dificuldades na previsão de custos e preços, tornando problemáticos o planejamento e a avaliação de projetos minerais (LABYS, 1992).

A longevidade dos empreendimentos implica que o minério extraído no futuro tem valor inferior ao extraído no presente, considerando-se o valor presente de ambos, como será visto na subseção 3.4.3. Da mesma forma, decisões sobre a própria operação de lavra, como a de lavrar inicialmente porções do depósito com maior teor, podem afetar o valor de longo prazo do empreendimento, aumentando os

lucros iniciais mas diminuindo em contrapartida a recuperação global das reservas e reduzindo a vida útil da mina.

Finalmente, é impossível conhecer exatamente a quantidade e teor do material a ser lavrado até que o depósito esteja exaurido, por dois motivos. O primeiro é a incerteza geológica. A avaliação quantitativa e qualitativa do depósito é feita por meio de amostragens, que resultam em estimativas de massa e teor. O segundo é a incerteza econômica. A quantidade e qualidade do minério a ser lavrado em um dado momento dependem dos custos de lavra e beneficiamento do minério e dos preços de venda das *commodities* resultantes. Como os preços futuros não podem ser previstos com precisão, normalmente é muito difícil determinar as reservas mesmo que as incertezas geológicas sejam pequenas. Desta forma, o teor de corte, definido como o teor mínimo que paga todas as operações necessárias para sua extração nas condições particulares do projeto em questão, varia ao sabor da conjuntura econômica e dos avanços tecnológicos. Como os teores não têm distribuição espacial uniforme no depósito, suas porções com teores mais baixos podem estar acima ou abaixo do teor de corte, o que consequentemente provoca a classificação de diferentes porções do depósito como estéril ou minério ao longo do tempo.

3.4.2 Investimentos

Para a execução de trabalhos de exploração geológica de níquel - desde a procura ao dimensionamento e avaliação da jazida - uma vez localizadas as áreas com indícios diretos e ou evidências indiretas, estabelece-se um plano de pesquisa organizado de forma semelhante aos de outras substâncias, adequado às peculiaridades técnicas do níquel.

Detectada a presença de minério durante os primeiros reconhecimentos de campo, um programa básico de exploração e pesquisa deve ser estabelecido para se definir a extensão, profundidade, espessura, teores, características físicas, paragênese mineral, dentre outros elementos, da jazida que se encontrar à medida dos avanços dos trabalhos. De forma resumida, os trabalhos numa primeira fase de avaliação a serem executados e os valores unitários, são apresentados na Tabela 1.

Como exemplo, tomando-se por base uma suposta área de 1.000 ha, em ambiente geológico propício para minério laterítico ou sulfetado de níquel, com expectativa de conter um corpo mineralizado, para um programa de pesquisa mineral completo de duração de dois anos os investimentos ascenderiam a mais de R$ 10,7 milhões[9] (valores de 2011 - vide detalhes na Tabela 2), dos quais cerca de R$ 10,0 milhões seriam gastos apenas em sondagem rotativa, com furos de 150 m de profundidade, em média, ou 92% do total, o que mostra o peso do custo deste serviço no investimento total das pesquisas.

Tabela 1 - Custos unitários dos serviços de pesquisa de níquel - valores de 2011

SERVIÇOS	UNIDADE DE MEDIDA	VALOR UNIT. (R$)	OBSERVAÇÃO
Infraestrutura de apoio	1	100.000,00	A depender da região
Geologia	1 Geólogo/mês	15.000,00	
Topografia	km	2.000,00	
Trincheiras	m	100,00	
Sondagem (inclui mobilização)	m	500,00	
Análises químicas	amostra	100,00	
Análises físicas		100,00	
Ensaios de Caracterização	amostra	5.000,00	
Ensaios de Concentração	amostra	50.000,00	Medida em toneladas
Relatório Final	1	100.000,00	
Pick Up	1	5.000,00	Leasing ou aluguel por mês
Eventuais	–	100.000,00	Imprevistos

Fonte: Projeto ESTAL

Tabela 2 - Estimativa de orçamento de exploração para níquel em área de 1.000 Ha - valores de 2011

ITEM	DETALHAMENTO	VALOR (R$)
Infraestrutura de apoio		100.000,00
Geologia	12 meses x R$ 12.000,00/mês	144.000,00
Topografia	40 km x R$ 2.000,00/km	80.000,00
Trincheiras	500 m x R$ 100,00/m	50.000,00
Sondagem	20.000 m x R$ 500,00/m	10.000.000,00
Análises químicas	400 x R$ 100,00/análise	40.000,00
Testes de caracterização	10 amostras x R$ 5.000,00/amostra	50.000,00
Testes de concentração	2 x R$ 50.000,00/teste	100.000,00
Relatório Final		100.000,00
Outros		100.000,00
TOTAL		**10.764.000,00**

[9] USD 6,4 milhões convertidos à taxa de câmbio média de 2011 (BRL 1,67/USD)

Complementarmente, considerando-se informações levantadas sobre os investimentos da Vale e outras grandes mineradoras em exploração/pesquisa mineral no Brasil e os seus resultados ao longo dos últimos 30 anos, é possível ter-se como referência aceitável (com boa acuracidade) os seguintes parâmetros e faixa de valor unitário investido por tonelada de reserva:

- parâmetros - área com ambiente geológico já conhecido e favorável a metais básicos; área situada em região com um mínimo de infraestrutura (urbana e de estradas estaduais e vicinais); programa de sondagem, cujos furos estejam distribuídos em malha de conformidade com os padrões internacionalmente aceitos; dimensionamento de reservas totais (medida+indicada+inferida) para se alcançar 100 milhões de toneladas de minério com de 0,95 a 1,05% de Ni;
- faixa de valor - investimentos totais entre USD 12 milhões e USD 15 milhões, ou, em valores unitários, na faixa de USD 0,12/tonelada a USD 0,15/ tonelada de reserva total.

Com relação a investimentos em projetos de expansão e de novas minas de níquel, a pesquisa sobre projetos recém-implantados e/ou com expectativa de implantação a curto e médio prazos, aponta para as faixas de valores mostrados do Quadro 4.

Quadro 4 - Estimativa de CAPEX para mineração e transformação de níquel - valores de 2009

TIPO DE PROJETO	VALOR UNITÁRIO DO CAPEX (USD/ tonelada/ano de Ni contido)
MINERAÇÃO	
CONCENTRADO DE MINÉRIO SULFETADO (mina a céu aberto, usina de concentração e infraestrutura)	
Expansão	5.000 a 7.000
Mina nova	8.000 a 12.000
CONCENTRADO DE MINÉRIO SULFETADO * (mina subterrânea, usina de concentração e infraestrutura)	
Mina nova	28.200
METALURGIA EXTRATIVA *	
USINA DE LIGA Fe–Ni	
Usina nova	49.900
HPAL (HIGH PRESSURE ACID LEACH)	
Usina nova	53.400
HEAP LEACH	
Usina nova	40.500

Fonte: Compilado a partir de projetos anunciados pelas empresas do setor

Pelos dados do Quadro 4, um empreendimento mineral para explotação de níquel a céu aberto projetado para a capacidade de 20.000 t/ano de metal produzido, tem seu custo médio de capital para implantação (CAPEX) estimado em USD 200 milhões para mina, mais USD 1,068 milhões para concentração e infraestrutura, totalizando cerca de USD 1,3 bilhões ou cerca de R$ 2,3 bilhões. Tais dados ilustram bem o fato citado por Torries (1998) que, desde meados da década de 1960, o capital necessário a grandes projetos de mineração excede em muito a capacidade de qualquer empresa de mineração e por isto a grande maioria dos projetos é financiada por meio de empréstimos e envolve *joint-ventures*. Tal fato, que já ocorria nos empreendimentos que explotavam o minério sulfetado, de teor mais alto e extração metalúrgica menos onerosa, agravou-se ainda mais com a necessidade de utilização dos minérios lateríticos/saprolíticos, que apresentam menores teores e cuja extração metalúrgica, quando viável, é quase sempre mais onerosa que a do minério sulfetado.

A seguir relaciona-se, a título ilustrativo, alguns investimentos realizados na implantação de novas minas de níquel, para demonstrar a capacidade financeira necessária para a viabilização deste tipo de empreendimento mineiro:

- Onça Puma (Vale) - USD 1,437 bi para 57.000 t Ni/ ano - 1,75%Ni, rota pirometalúrgica (BRASIL MINERAL, 2007b);
- Níquel do Vermelho (Vale) - USD 1,2 bi para 46.000 t Ni/ ano + 2.800 t Co/ano, rota hidrometalúrgica (BRASIL MINERAL, 2007b);
- Jacaré e Morro Sem Boné (Anglo American) - USD 6,0 bi previstos, rota hidrometalúrgica.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

A quantificação da complexidade.

Marczyk (2009) propõe em sua Teoria da Complexidade Quantitativa (TCQ) que a complexidade C de um sistema descrito por um vector {x} de N componentes (valores finitos e quantificáveis), seja definida como uma função de suas estrutura S e entropia E:

$$C = f\,(S \circ E)$$

na qual $S \in R^{N \times N}$ representa uma matriz de adjacência, $E \in R^{N \times N}$ é uma matriz de entropia e $\circ$ é o produto matricial de Hadamard. A equação anterior representa uma definição formal de complexidade e constitui a equação fundamental da TCQ. Em sua implementação numérica, a matriz de adjacência é determinada por meio de uma abordagem multidimensional por sua maior eficiência computacional. A matriz de adjacência S obtida estabelece a estrutura, também denominada topologia, do sistema em questão e, em particular, reflete as interdependências entre os componentes de {x} representando-as por meio de grafos (mapas).

A matriz de entropia E reflete a média da quantidade de informação trocada entre os nós do sistema. Em contexto termodinâmico, entropia representa uma medida de desordem que tende a se opor à estrutura, ou organização.

As intensidades das relações entre os pares de nós da matriz de adjacência são determinados por meio do cálculo das correlações globais correspondentes. A entropia foi escolhida como medida da dispersão porque evita as desvantagens das técnicas convencionais em se pretende descrever os dados por meio de modelos de regressão, análise estatística ou outros métodos tradicionais, especialmente nos casos em que os dados não se adequam a tratamento estatístico. Uma vez que as matrizes de entropia e de adjacência tenham sido obtidas, pode-se calcular a complexidade de um sistema dado como a norma da matriz, como se segue:

$$C = \|S \circ E\|$$

Uma propriedade fundamental desta métrica é seu limite superior conhecido como complexidade crítica, C_S, formalizado na equação a seguir:

$$C_S = \|S \text{ o } E_{máx}\|$$

Na qual $E_{máx}$ é a matriz de entropia em que as relações entre os parâmetros de um sistema estão dispersos e privados de estrutura. De forma semelhante, calcula-se a complexidade mínima, C_M, como se segue:

$$C_M = \|S \text{ o } E_{mín}\|$$

Próximo à complexidade mínima, o sistema em questão é quase totalmente privado de incerteza e funciona de maneira determinística, na qual domina sua estrutura. Na proximidade do limite superior de complexidade do sistema domina a incerteza e as relações entre os componentes de {x} são fracas, caracterizadas portanto por correlações fracas.

A entropia representa a “incerteza” do sistema e é caracterizada por meio da entropia de Shannon (SHANNON, 1948). Na Teoria da Informação, a entropia é uma medida da incerteza em uma variável aleatória. Neste contexto, o termo quantifica o valor esperado de informação contida na mensagem. Uma variável que possa ser adequadamente descrita em função de outra por uma relação linear é um exemplo de baixa entropia de Shannon, em oposição a um fluxo de dados como o do deslocamento vertical em relação ao tempo correspondente ao movimento browniano do voo de uma mosca doméstica. A entropia de Shannon corresponde assim à imprevisibilidade média de uma variável aleatória, que é equivalente ao seu conteúdo de informação:

$$\mathrm{H(X)} = -\sum_{\mathrm{i=1}}^{\mathrm{n}} \mathrm{p(x_i).\log_b\, p(x)}$$

na qual $\mathrm{p(x_i)}$ representa a função de densidade de probabilidade e b indica a base do logaritmo. Para b = 2 a unidade de entropia é o *bit*. Em virtude de sua definição, C = f (S o E), a unidade de complexidade também é o bit, que se passa a denominar cbit ou bit de complexidade.

As correlações globais entre os componentes de {x} são calculadas com base na entropia mútua ou informação mútua. Formalmente, a informação mútua de duas variáveis aleatórias discretas X e Y pode ser definida como:

A entropia de Shannon pode ser calculada para cada par de possíveis variáveis e, neste caso, será chamada de entropia mútua entre duas variáveis X e Y, expressa como:

$$\mathrm{I(X,Y)} = \iint p_{X,Y}\ (\mathrm{x,y}) \log \frac{\mathrm{p(x,y)}}{\mathrm{p}_X(\mathrm{x})\mathrm{p_Y(y)}}\ dxdy$$

onde p (x, y) é a função de distribuição de probabilidade conjunta de X e Y, e p(x) e p(y) são as funções de distribuição de probabilidade marginais de X e Y, respectivamente. Para o conjunto de dados das duas variáveis x e y plotadas em um gráfico de dispersão (*scatter plot*), a distribuição de probabilidade marginal p (x, y) é a soma da probabilidade de se encontrar ambos os valores x e y de variáveis em uma determinada região limite do gráfico de dispersão, de modo que p(x) e p (y) sejam a soma das probabilidades de se encontrar apenas um dado de x ou de y, respectivamente, em uma determinada região limite do gráfico de dispersão.

Tomando por base o valor da entropia mútua, o valor de correlação global, ou generalizada, representando o acoplamento entre um par específico de variáveis, é definido por Granger (1994) e Darbelay (1998) como:

$$\lambda(X,Y) = \sqrt{1 - \exp^{-2I(\mathrm{X,Y})}}$$

A função λ(X, Y) captura a dependência linear e não-linear total entre X e Y e assume valores entre 0 e 1. Nos casos notáveis em que λ(X, Y) = 0 ou λ(X, Y) = 1, X não contém nenhuma informação sobre Y, ou há uma relação perfeitamente determinística entre os vetores X e Y, respectivamente.

Ao contrário da variância, que mede a concentração apenas em torno da média, a entropia mede a dispersividade da densidade, independentemente da localização da concentração (EBRAHIMI, 1999). É uma medida mais geral de incerteza do que variância uma vez que utiliza uma maior quantidade de informação sobre a distribuição de probabilidade, o que justifica sua escolha em detrimento de outras abordagens convencionais e mais tradicionais.

Na Figura 35 a seguir encontram-se exemplos de gráficos de dispersão e suas respectivas entropias mútuas. Tonalidades mais escuras dos pontos denotam sobreposição de amostras.

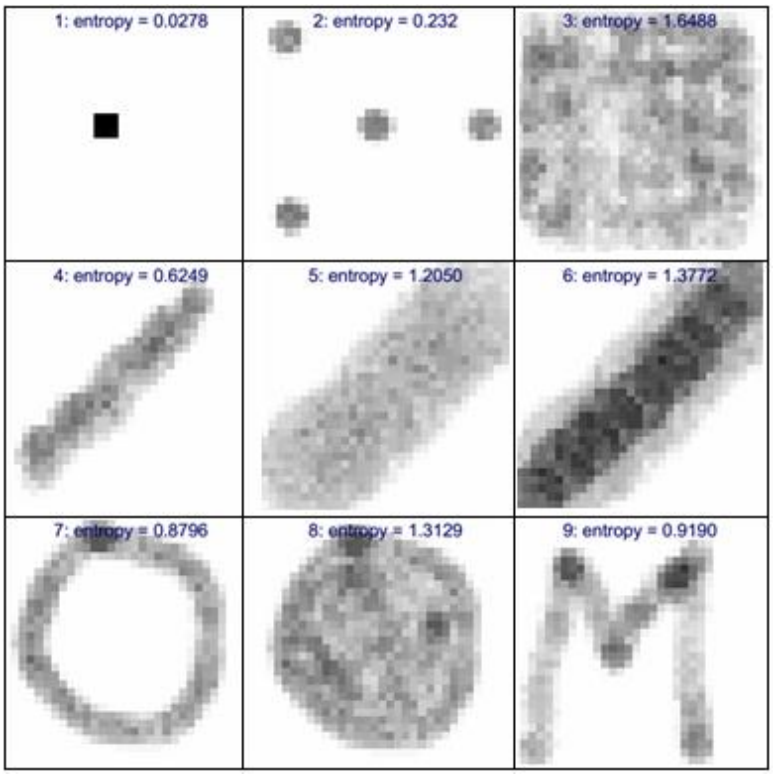


Figura 35 - Gráficos de dispersão e respectivas entropias mútuas

Mapas cognitivos

Uma ferramenta útil na análise e visualização de sistemas complexos é o mapa cognitivo. Segundo Kitchin (1994), um mapa cognitivo serve para construir e acumular conhecimento espacial, permitindo criar a visualização de imagens e reduzir a carga cognitiva, facilitando o aprendizado e a retenção da informação. Ainda segundo este autor, este tipo de pensamento espacial pode ser utilizado como metáfora mesmo para problemas não espaciais nos quais a visualização espacial possa ser utilizada como auxílio. Quando se utiliza a relação entre os elementos do mapa para calcular a "força de impacto" dos elementos no sistema, tem-se então o que Kosko (1986) define como Mapa Cognitivo *Fuzzy* (FCM -*Fuzzy Cognitive Map*), que é a forma utilizada pelo software para exibir os sistemas analisados e suas respectivas estruturas. A Figura 36 exibe um exemplo de mapa cognitivo *fuzzy* tradicional e a Figura 37 a forma utilizada pelo software.

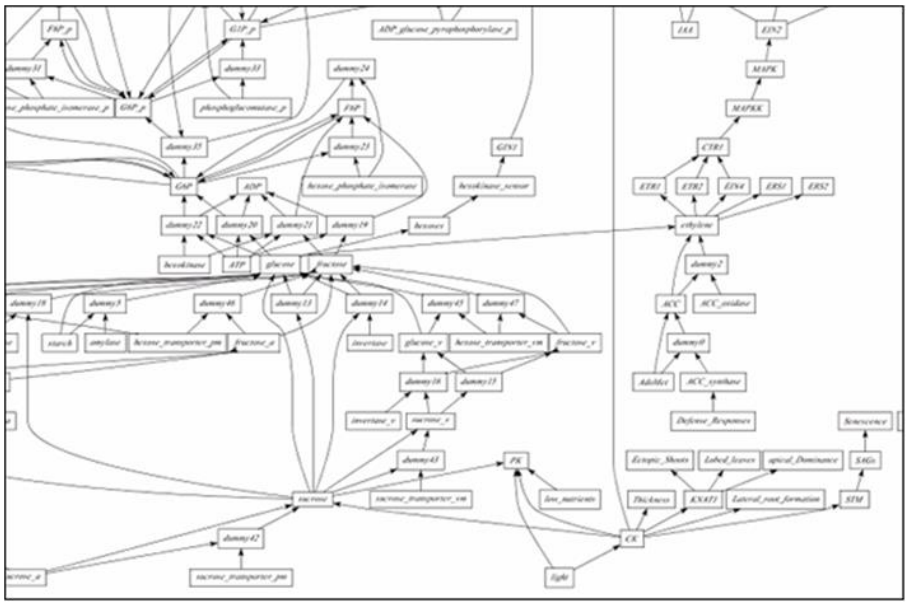


Figura 36 – Apresentação tradicional de mapa cognitivo *fuzzy*

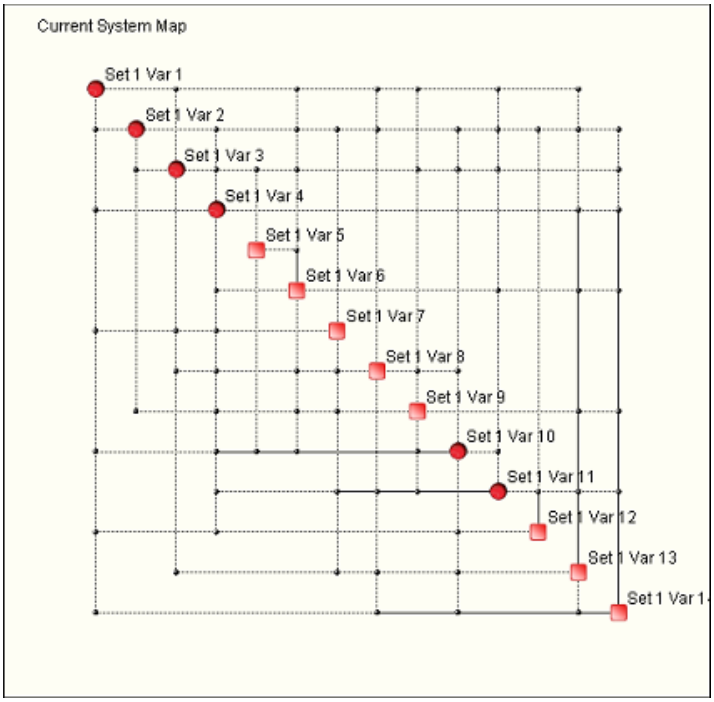


Figura 37 - Apresentação de mapa cognitivo *fuzzy* pelo software utilizado

No caso do FCM utilizado pelo software, as variáveis estão representadas pelos símbolos sobre a diagonal do mapa, e as linhas verticais e horizontais representam conexões (acoplamentos) entre as variáveis no caso de haver um ponto entre suas intersecções.

Fitness landscape

Em sua conceituação de análise de complexidade, Marczyk (2009) toma emprestado da biologia evolucionária o conceito de *fitness landscape*, ou paisagem de aptidão, representando, neste caso, o conjunto multidimensional de todos os valores possíveis para as variáveis consideradas. Subconjuntos deste *fitness landscape* podem apresentar acoplamentos locais e se apresentar como modos, ou atratores. No modo de análise estática do *software* de análise, estes modos podem ser extraídos como mapas independentes, representando modos de funcionamento do sistema que existem apenas sob determinados períodos ou condições. O mapa do sistema é correspondente à sobreposição de todos os mapas de modos individuais. Cada mapa tem uma medida de força, proporcional ao número de amostras que nele toma parte. O número de mapas, ou modos, identificado pelo *software* é, em si, uma medida da complexidade do sistema. Estes modos podem ser exibidos individualmente e estão divididos, conforme sua força, entre dominantes e residuais, sendo que o conjunto dos modos dominantes responde por cerca de 90% da complexidade total do sistema. Na Figura 38 a seguir exibe-se um exemplo de *fitness landscape* com dois atratores e, na Figura 39 um exemplo de modos dominantes e residuais.

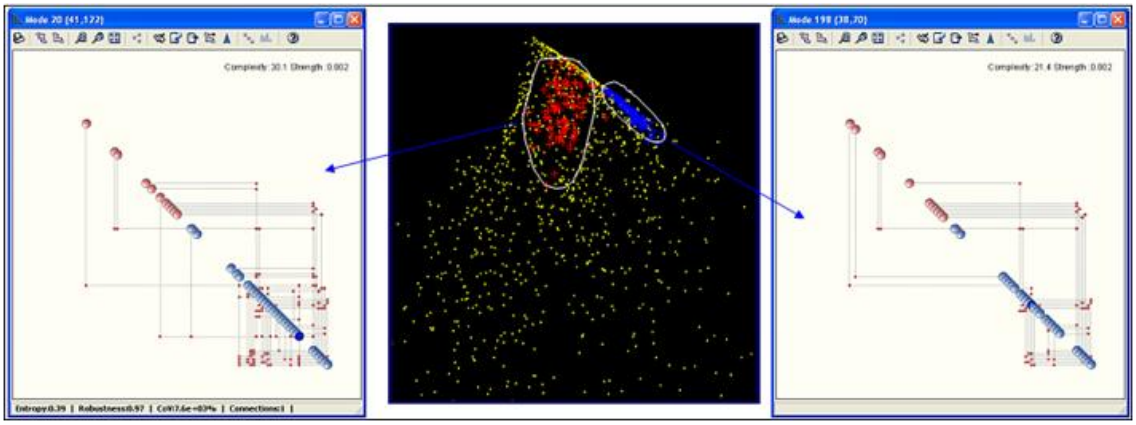


Figura 38 - Dois atratores e respectivos mapas em um *fitness landscape*

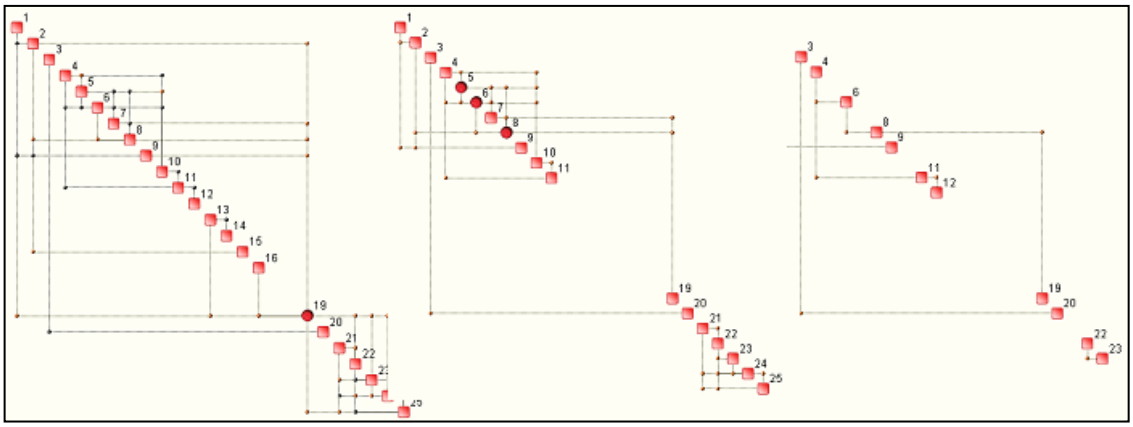


Figura 39 - Exemplo de um mapa de sistema (esquerda) e dois dos modos que o compõem, um dominante (centro) e um residual (direita)

O processo de análise de complexidade

O método utilizado para a análise de complexidade de um sistema é considerado *model-free*, ou independente de modelos, uma vez que o resultado é obtido sem a utilização de correlações estatísticas de qualquer espécie e também dispensando qualquer outro modelo subjacente ao qual os dados tenham que ser ajustados.

O sistema a ser analisado deve ser representado por uma planilha (em formato Excel, csv ou texto tabulado) em cujas colunas estejam sequências de amostras das variáveis componentes do sistema. A matriz representada pela planilha pode ser esparsa (faltando valores em algumas células) mas os dados devem estar sincronizados ao longo das linhas.

Ao se alimentar os dados no sistema, é feita uma análise estatística preliminar que fornece, os seguintes resultados para cada variável, além dos dados triviais de mínimo, máximo, média, moda e coeficiente de variação (100.σ/média):

robustez - a robustez de uma variável aleatória é a medida da aderência de sua função densidade de probabilidade à da curva de Gauss. É calculada por meio do teste de Kolmogorov-Smirnov (K-S) (NIST, 2012).

entropia - a relevância de variáveis é baseada na entropia de Shannon.

número de *outliers* por variável - indicada o número de *outliers* simples. Uma variável que tenha *outliers* simples é destacada em negrito.

número de amostras - Esta informação é útil quando se trata de conjuntos de dados incompletos.

Na Tabela 3 exibe-se um exemplo do resultado da análise estatística.

Tabela 3 - Exemplo de resultados da análise estatística

Statistics

No. of Variables: 34 | No. Samples: 22

	Name	Min	Mean	Most Likely	Current	Max	CoV	Robustness	Entropy	Nº Outliers	Nº Samples
1	Income from financing activities	7.33e+02	9.26e+02	8.77e+02	7.63e+02	1.21e+03	13.6 %	92.5 %	1.50	N/A	22
2	Provision for doubtful debts	8.50e+01	1.67e+02	1.71e+02	1.67e+02	2.57e+02	31.3 %	88.1 %	1.56	N/A	22
3	Income from financing activities	5.09e+02	7.59e+02	8.06e+02	5.96e+02	1.10e+03	21.8 %	93.3 %	1.50	N/A	22
4	Operating commissions	3.91e+02	4.78e+02	4.49e+02	3.91e+02	5.85e+02	11.4 %	90.9 %	1.55	N/A	22
5	Net income (loss) on investment in	-3.00e+01	1.10e+01	1.30e+01	-2.00e+00	5.60e+01	182.7 %	90.0 %	1.38	N/A	21
6	Other Income	2.00e+01	9.34e+01	7.04e+01	8.10e+01	1.88e+02	44.7 %	92.3 %	1.48	N/A	22
7	Total non-financing mcome	4.70e+02	5.82e+02	5.72e+02	4.70e+02	6.75e+02	9.1 %	96.4 %	1.50	N/A	22
8	Salaries and related expenses	5.51e+02	7.04e+02	5.96e+02	5.74e+02	9.96e+02	18.5 %	89.4 %	1.49	N/A	22
9	Maintenance and depreciation of	1.53e+02	1.76e+02	1.60e+02	1.58e+02	2.23e+02	12.8 %	77.9 %	1.24	N/A	22
10	Other expenses	1.48e+02	2.55e+02	2.56e+02	1.67e+02	3.63e+02	23.4 %	92.7 %	1.58	N/A	22
11	Total non-financiring expenses	8.75e+02	1.13e+03	9.38e+02	8.99e+02	1.50e+03	16.7 %	90.0 %	1.57	N/A	22

Variables | Samples

Uma vez alimentados os dados e feita a análise estatística, pode-se solicitar dois tipos de análise: estática ou dinâmica.

Na análise estática todos os pares de variáveis possíveis serão submetidos à seguinte sequência:

- construção de um gráfico de dispersão das duas variáveis;
- transformação do gráfico de dispersão em uma imagem 2d;
- análise da imagem e medição de seu conteúdo de informação e estrutura, por meio da avaliação da entropia de Shannon e da entropia mútua;
- se for detectado um acoplamento entre as duas variáveis, criar um link no mapa.

Na Figura 40, encontra-se um mapa de entropia, chamado de “Quick View” no *software*, o qual contém todos os pares de variáveis com suas entropias de Shannon (eixo vertical) e entropias mútuas (eixo horizontal). São destacados e exibidos dois gráficos de dispersão correspondentes a um par pertencente ao conjunto de pares azuis (irrelevantes - contém pouca estrutura) e um correspondente ao conjunto dos vermelhos, no qual se percebe mesmo visualmente a estrutura da imagem. A diferença entre a estrutura destes dois pares se manifesta no grau de correlação generalizada, respectivamente 0,38 e 0,87.

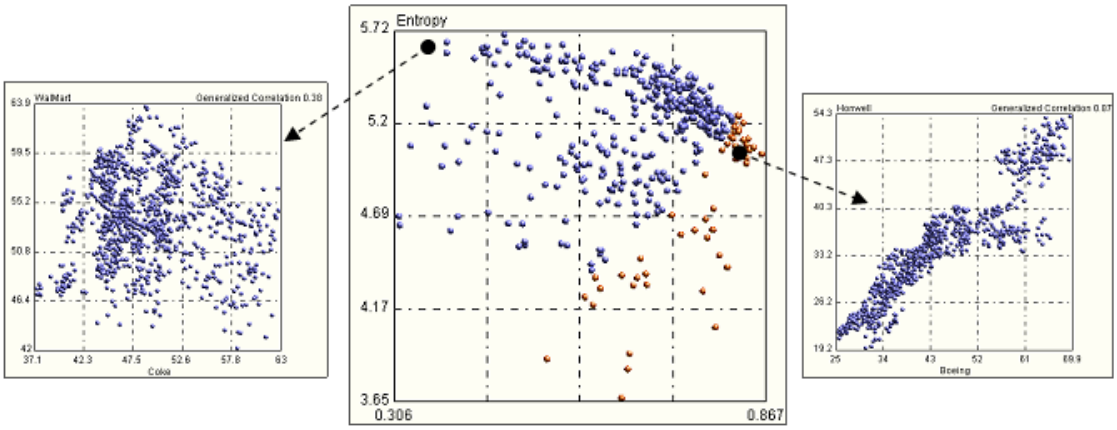


Figura 40 - Mapa de entropias e gráficos de dispersão de baixa e alta estrutura

Uma vez calculados todos os pares e montado o mapa do sistema, um algoritmo proprietário calcula, baseado nas medidas de entropia e estrutura obtidas, a complexidade operacional do sistema bem como suas complexidades crítica e mínima. A complexidade mínima é uma medida formal que representa o sistema funcionando em modo determinístico. A medida de complexidade crítica indica o nível de complexidade máxima suportado pelo sistema sem que entre em colapso. O funcionamento do sistema em níveis de complexidade próximos ao crítico pode causar mudanças de fase no mesmo, nas quais o sistema passa a operar de modo diverso, sem aviso prévio, estabilizando-se em outro atrator. A medida de robustez estrutural indica a distância entre a complexidade operacional do sistema e a complexidade crítica de forma percentual, sendo 100% a maior distância possível (complexidade mínima ou residual) e 0% quando coincidem. A robustez estrutural é a medida da resiliência do sistema, indicando sua capacidade de resistir a perturbações externas, não tendo qualquer relação com a medida de robustez estatística calculada para cada variável pela distância K-S. A Figura 41 exibe um exemplo de mapa de sistema com as respectivas medidas de complexidade e robustez estrutural. As variáveis com a maior quantidade de acoplamentos com as outras são chamadas Hubs (destacadas por círculos na diagonal do mapa) e são importantes pela rapidez com que propagam instabilidades para o resto do sistema.

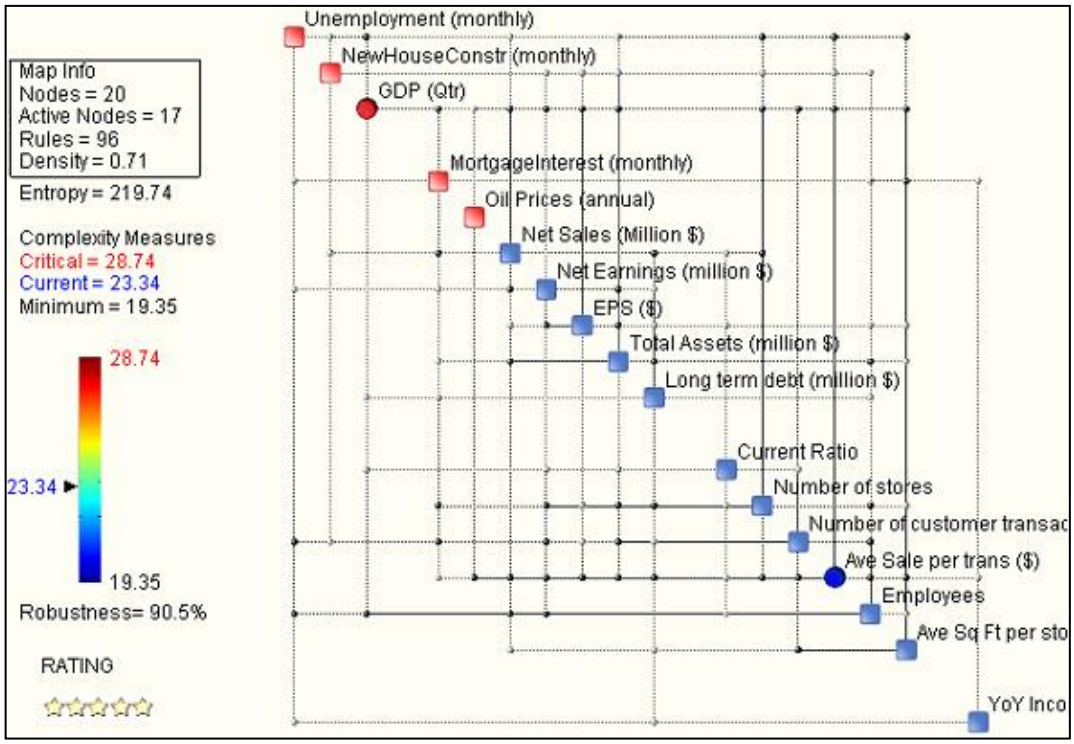


Figura 41 - Mapa de entropias e gráficos de dispersão de baixa e alta estrutura

Séries temporais podem ser também submetidas à análise dinâmica. Nesta modalidade o conjunto de dados é dividido em janelas ou passos de mesma duração, como se pode verificar na Figura 42, e uma análise estática é feita para cada uma das janelas.

A sequência dos resultados das análises pode então ser observada por meio de três gráficos: de Complexidade, de Entropia e de Robustez.

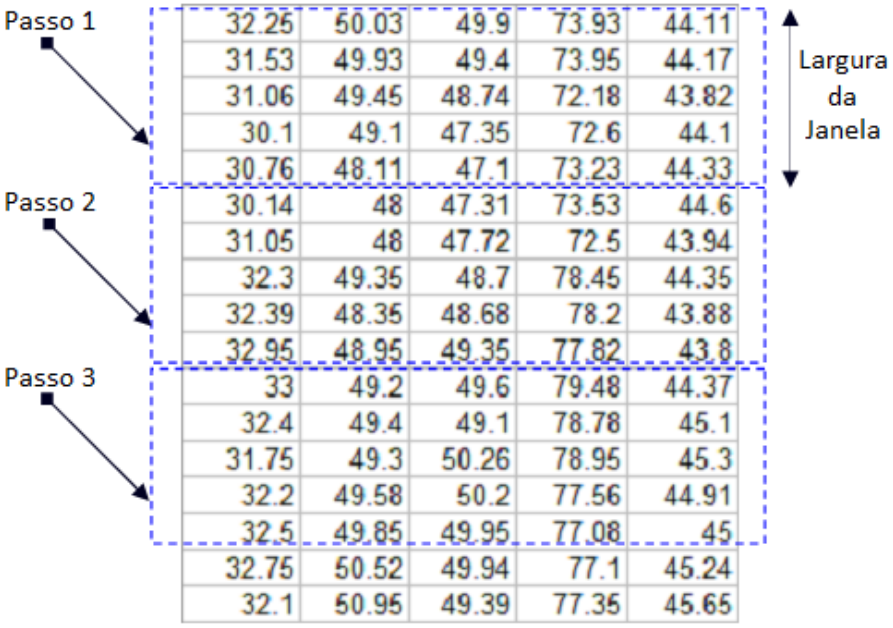


Figura 42 - Análise dinâmica para séries temporais - passos e largura da janela

A Figura 43a mostra um exemplo do gráfico de evolução de complexidade. O traço superior corresponde à complexidade crítica, o do meio à complexidade operacional e o inferior à complexidade mínima. A Figura 43b exibe a evolução da entropia, associada à imprevisibilidade do sistema e na Figura 43c pode-se verificar a evolução da robustez e também um índice global de estabilidade do sistema, baseado na variação da robustez.

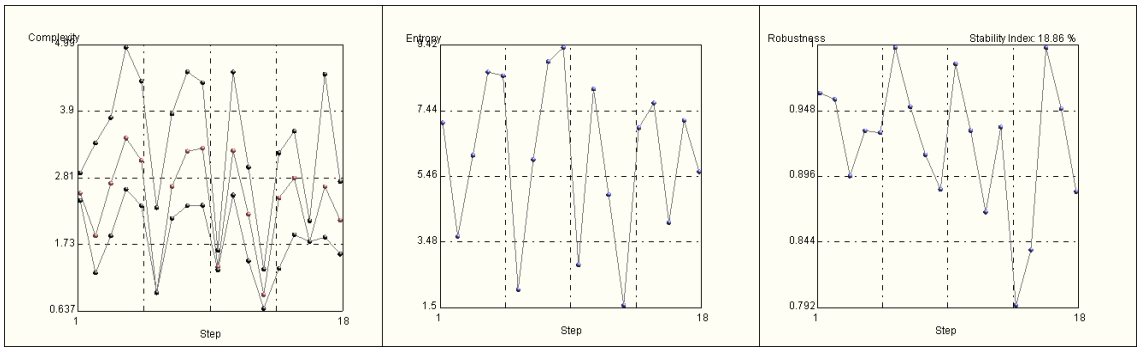


Figura 43 - Análise dinâmica - Evolução temporal da complexidade (a-esquerda), da entropia (b-centro) e da robustez estrutural (c-direita)

Como a robustez indica a distância entre a complexidade operacional do sistema e a sua respectiva complexidade crítica, em cuja proximidade um aumento na entropia do sistema pode causar um colapso ou uma mudança de fase ou modo, o aumento de entropia e a redução de robustez simultâneos em um determinado período podem ser considerados precursores de crises no sistema e, desta forma,

oferecem uma avaliação do risco sistêmico. Entende-se aqui “risco sistêmico” como definido por Hendricks (2009): “Um risco sistêmico é uma transição de fase entre um ponto de equilíbrio para outro de desempenho degradado, caracterizado por múltiplos mecanismos de reforço retroalimentados que dificultam a recuperação do sistema”. Ainda segundo Marczyk (2009) variações bruscas de complexidade com diferenças significativas nas complexidades anterior e posterior ao evento indicam eventos traumáticos no sistema, indicando mudanças de fase.

Convém alertar que a técnica descrita não se aplica na antecipação de crises originadas por fatores exógenos imprevisíveis como os “cisnes negros” (*black swans*) descritos por Taleb (2007), tais como atos terroristas, catástrofes naturais ou outros de mesma natureza.

Dados e fronteiras do sistema

Os dados utilizados neste trabalho foram extraídos em sua maioria de fontes públicas, com exceção preços diários de commodities da LME que foram consultados no sistema de banco de dados da Thomson Reuters a partir da rede da USP, incluindo:

USGS - United States Geological Survey - dados anuais sobre commodities minerais como preços, volumes, estoques e produção secundária.

Banco Mundial - “Pink sheet” - dados mensais de preços de commodities e energia.

IMF - Fundo Monetário Internacional - - dados mensais de preços de commodities e energia.

Como já discutido na revisão bibliográfica, as fronteiras de um sistema complexo são relativamente arbitrárias e dependentes do enfoque que se deseje dar à análise. No caso do presente trabalho, devido à globalização do mercado de *commodities*, à velocidade da comunicação de informações no mercado, à centralização da precificação na LME e, não menos importante, à disponibilidade dos dados, a maior parte das análises utilizou informações oriundas do USGS como *proxy* para o mercado mundial, entendendo o autor tratar-se de representação adequada no caso da análise proposta, onde não se procura obter resultados de extrema precisão mas sim indicações de tendências globais e riscos sistêmicos.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Análise Estática de um grupo de seis metais base

Uma das formas de compreender o comportamento do mercado do níquel é por meio da análise dos metais base, grupo que inclui outros cinco metais além do níquel, a saber: alumínio, cobre, chumbo, estanho e zinco. Trata-se de um sistema simplificado mas que demonstra de forma clara alguns fundamentos do mercado, como será visto a seguir.

Inflação

A inflação da moeda norte americana, usada nas cotações de preço dos metais induz uma modulação comum a todas as variáveis (preços) criando um acoplamento artificial entre elas e, assim, um elemento estrutural inexistente. O resultado é que um par de variáveis que teriam normalmente pouco ou nenhum acoplamento passam a sofrer as mesmas variações de preço nominal impostas pela inflação, surgindo daí um pseudo-acoplamento. Desta forma, a inflação deve ser expurgada dos preços por meio do uso de moeda constante nas análises. Utiliza-se a seguir o grupo dos metais base para demonstrar o fenômeno e seus efeitos na análise.

Inicialmente, analisa-se o mapa de sistema formado pelos valores nominais das *commodities*. A evolução dos preços deste grupo de metais pode ser verificada nos gráficos da Figura 44 e da Figura 45. Na Figura 44 os picos de preço do níquel e do estanho distorcem a escala do gráfico tornando difícil identificar os preços anteriormente à década de 1970. Desta forma na Figura 45 têm-se os mesmos dados plotados em escala logarítmica, o que torna clara a leitura e a percepção de que há um viés comum a todos os dados que é a inflação da moeda norte americana.

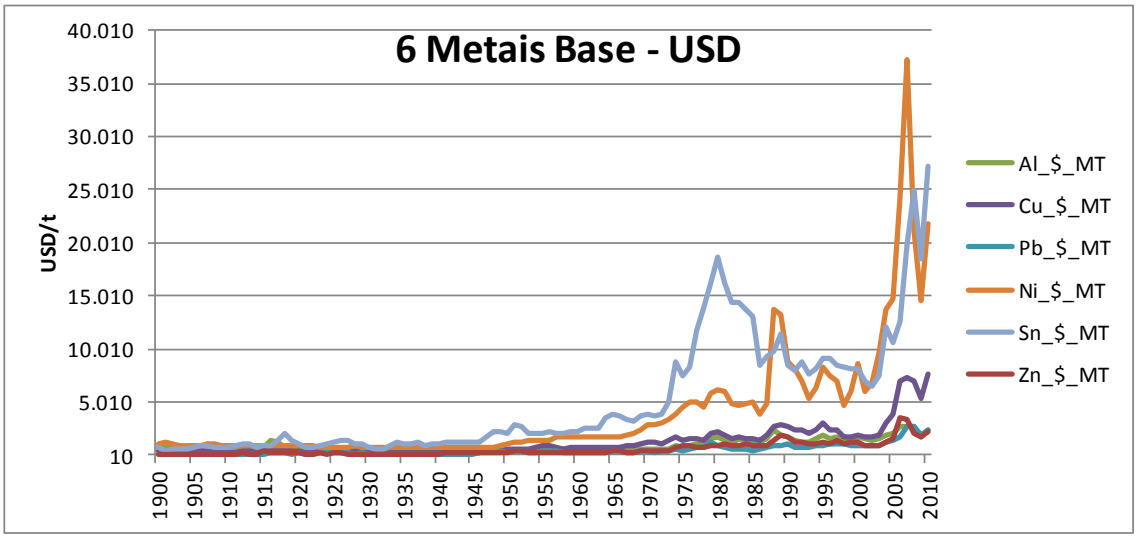


Figura 44 - Evolução dos preços nominais de seis metais - escala linear

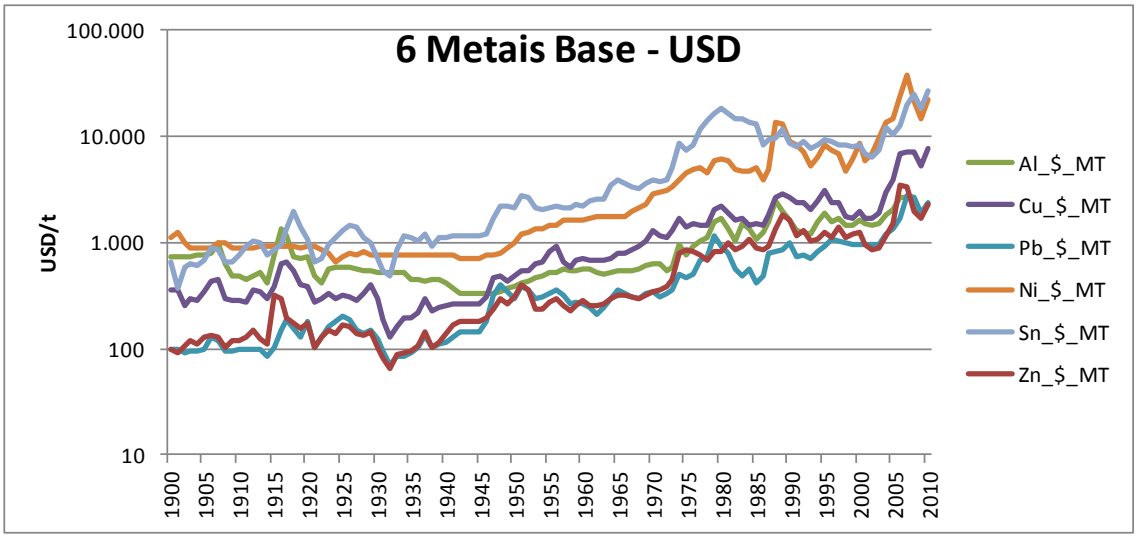


Figura 45 - Evolução dos preços nominais de 6 metais - escala logarítmica

O resultado deste viés comum se nota na Figura 46 na qual se verifica que todos os seis componentes do sistema tem acoplamento com todos os demais. A complexidade operacional está muito próxima da mínima e portanto a robustez é muito alta, indicando assim um sistema muito estável.

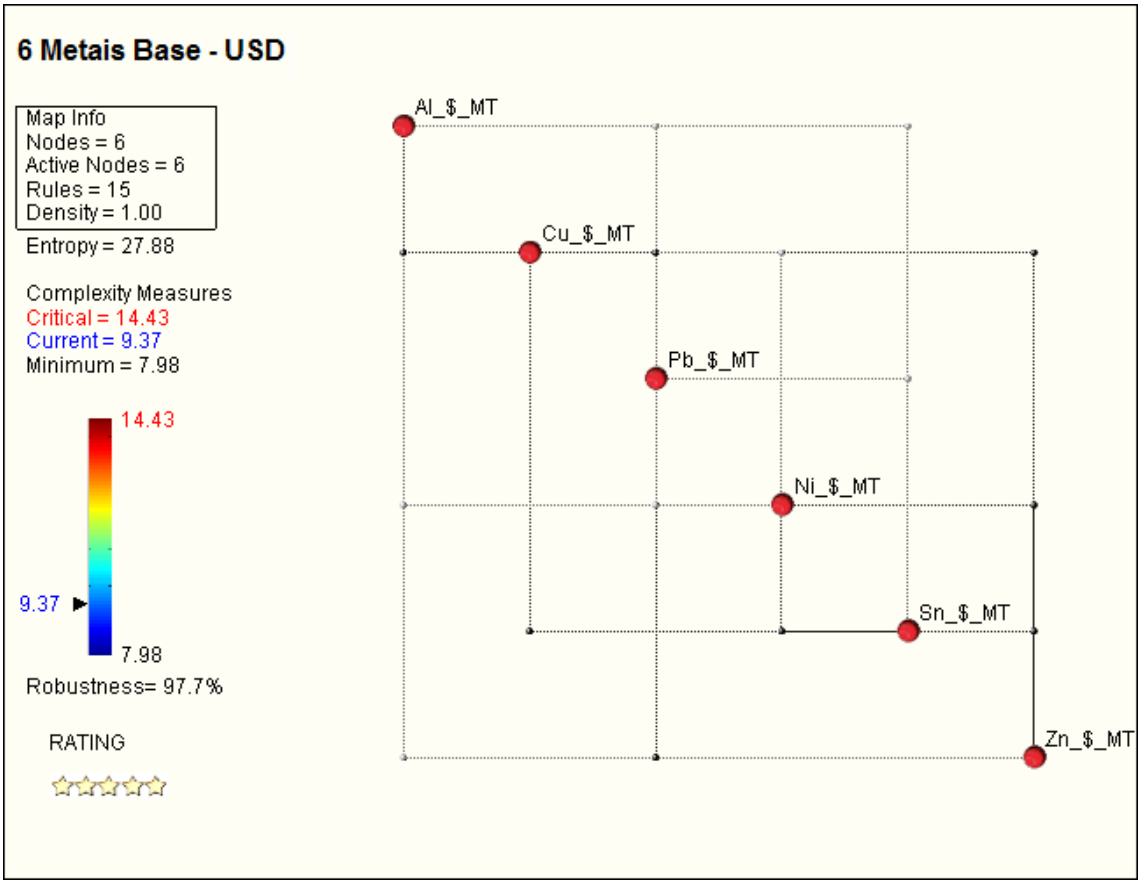


Figura 46 - Mapa de sistema para os preços nominais dos 6 metais

O alto grau de conectividade intrasistêmica indica alto grau de acoplamento entre seus componentes. Pode-se ver na Figura 47 a e b os *scatter plots* dos acoplamentos de menor e maior força de acoplamento correspondentes às conexões Cu-Ni e Cu-Sn respectivamente no mapa de sistema.

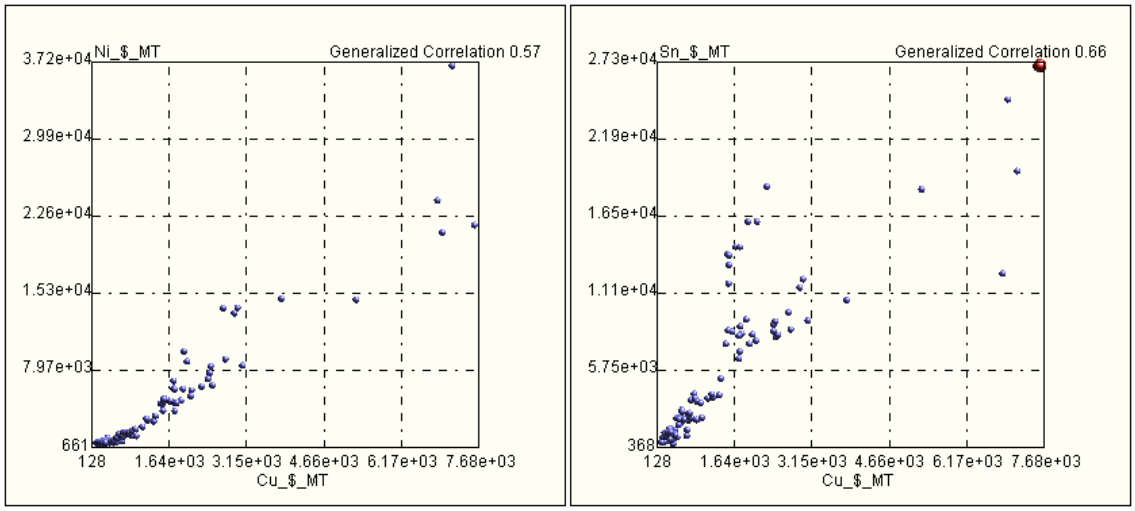


Figura 47 - Exemplos de *scatter plots* de maior e menor força de acoplamento para o sistema de preços nominais dos 6 metais

Plotando-se os mesmos dados em *scatter plots* com eixos logarítmicos (Figura 48 a e b) o forte acoplamento entre as variáveis fica mais evidente que na escala linear. As equações obtidas por regressão não linear alométrica (potências) demonstram a forte correlação também obtida com a aplicação de meios estatísticos convencionais, embora não se deva esperar correspondência direta entre o R^2 e a correlação generalizada devido aos diferentes métodos utilizados.

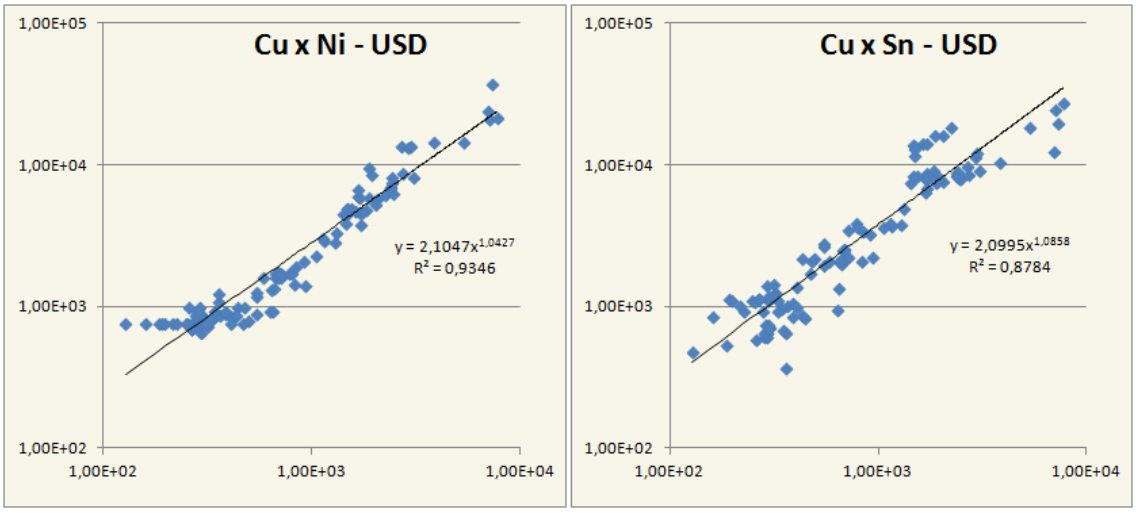


Figura 48 - *Scatter plots* da Figura 47 plotados em escala logarítmica

Tomando-se então o valor do dólar norte americano de 1998 e convertendo-se todos os outros valores para esta nova base, tem-se um novo conjunto de dados em moeda constante do qual se removeu o viés artificial, o que altera radicalmente o comportamento do sistema.

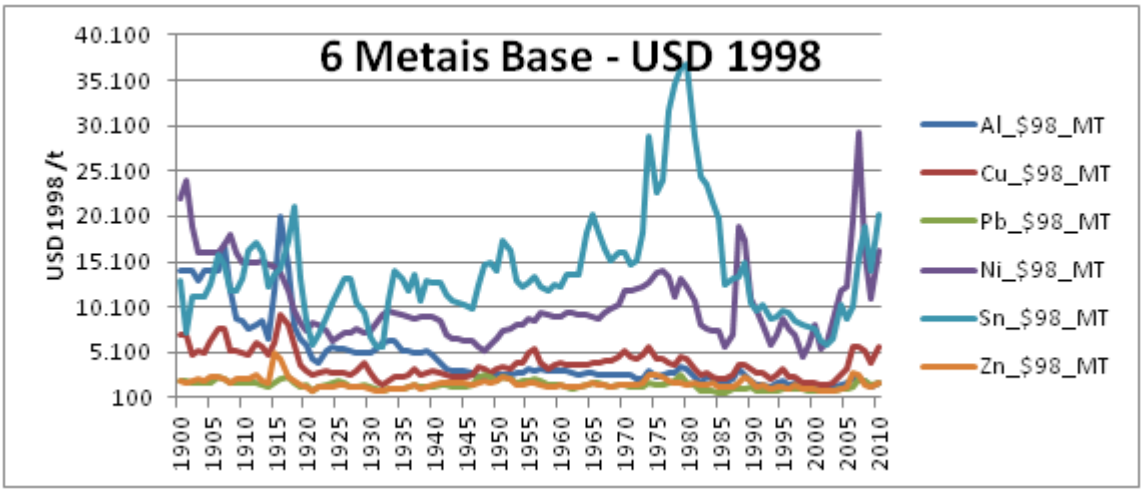


Figura 49 - Evolução dos preços em USD 1998 de 6 metais - escala linear

Da mesma forma como foi visto para os valores nominais, apresentam-se os dados em moeda constante plotados novamente de forma linear na Figura 49 e logarítmica na Figura 50.

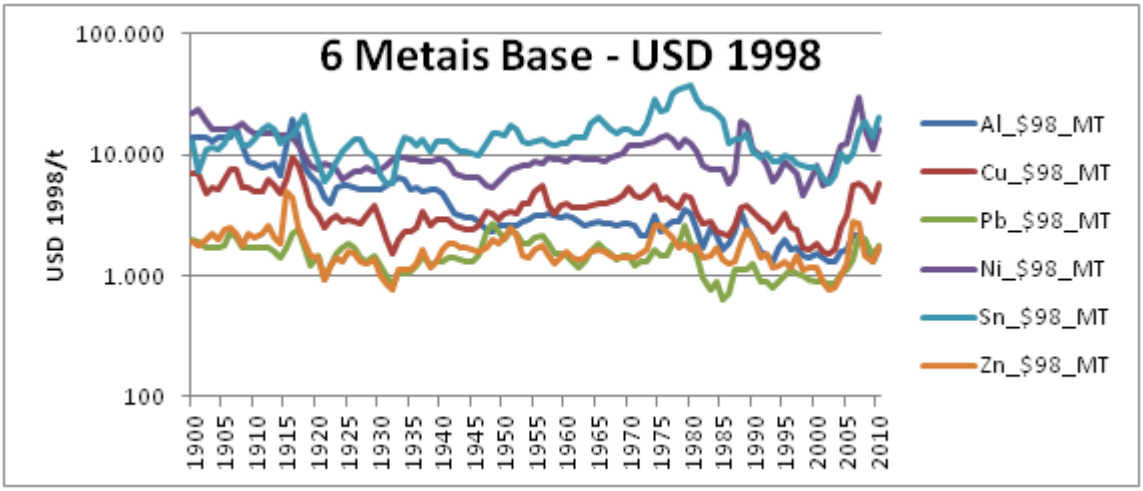


Figura 50 - Evolução dos preços em USD 1998 de 6 metais - escala logarítmica

Percebe-se que o viés comum foi removido, embora haja períodos de movimentos comuns dos preços, motivados por fatores globais da economia.

Como seria de se esperar, tendo-se removido um fator comum importante como a inflação, o mapa de sistema resultante, exibido na Figura 51, mostra uma significativa redução no número de acoplamentos, de 15 para 5 conexões, sendo que 2 dos metais não apresentaram acoplamento com nenhum outro. A complexidade operacional se afasta da mínima mas a robustez ainda é alta, mantendo a indicação de estabilidade do sistema. Devido à redução da estrutura do sistema, tendo removido 2 de seus componentes e eliminando várias conexões entre os demais componentes, os números absolutos de complexidade também se reduzem: a complexidade crítica cai de 14,4 para 7,4, a operacional cai de 9,4 para 7,1 e a mínima cai de 8,0 para 6,9.

A redução do grau de conectividade intrasistêmica de 15 para 5 indica que a força de acoplamento entre seus componentes provavelmente diminuiu, o que deve se refletir nos *scatter plots*. Desta forma mostra-se novamente na Figura 52 a e b os *scatter plots* dos acoplamentos de menor e maior força de acoplamento correspondentes às conexões Al-Sn (0,13) e Cu-Ni (0,51) respectivamente no mapa de sistema, de forma a compará-los com a situação sem o expurgo da inflação. Percebe-se claramente a maior dispersão dos pontos, sendo que no caso do par Al-

Sn se torna mesmo impossível reconhecer visualmente qualquer estrutura subjacente.

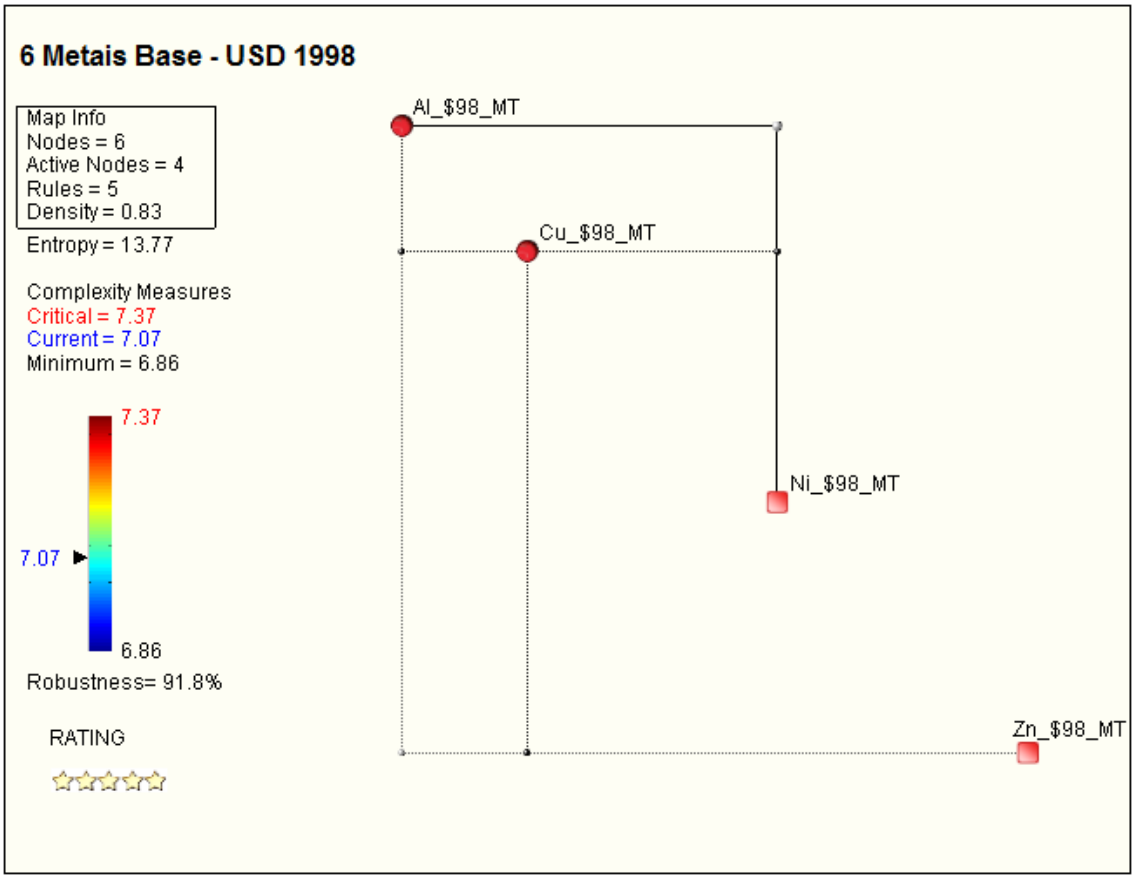


Figura 51 - Mapa de sistema para os preços em USD 1998 dos 6 metais

A queda da força de acoplamento de 0,60 no caso do par Al-Sn para apenas 0,13, demonstra de forma inequívoca a forte influência do fator inflacionário na criação de acoplamentos falsos. No caso do acoplamento do par Cu-Ni, a queda na força de acoplamento foi menos pronunciada, de 0,57 para 0,51, indicando a existência um acoplamento estrutural real entre os preços dos dois metais.

Plotando-se novamente estes dados em *scatter plots* com eixos logarítmicos (Figura 53 a e b) verifica-se, no caso do par Cu-Ni, uma queda de 0,93 para 0,56 no R^2 que, embora significativa, ainda permite identificar a existência da correlação. Por outro lado, no caso do par Al-Sn, as equações obtidas por regressão não linear (polinomial de 2º grau; outros modelos resultaram em R^2 ainda menor) demonstram a inexistência de correlação demonstrável a partir de regressão por meios estatísticos convencionais (R^2=0,008).

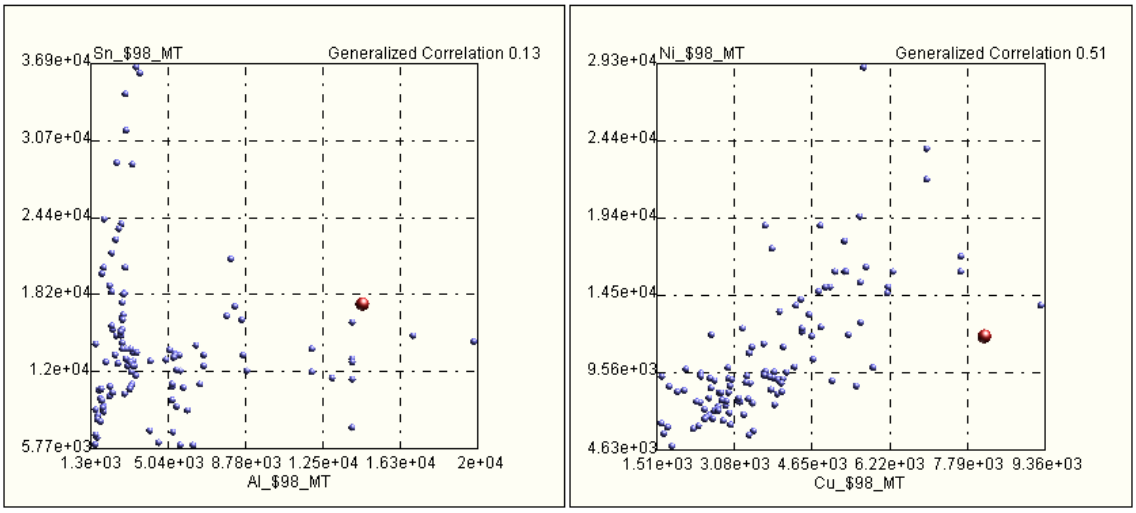


Figura 52 - Exemplos de *scatter plots* de menor (a-esquerda) e maior (b-direita) força de acoplamento para o sistema de preços em USD 1998 dos seis metais

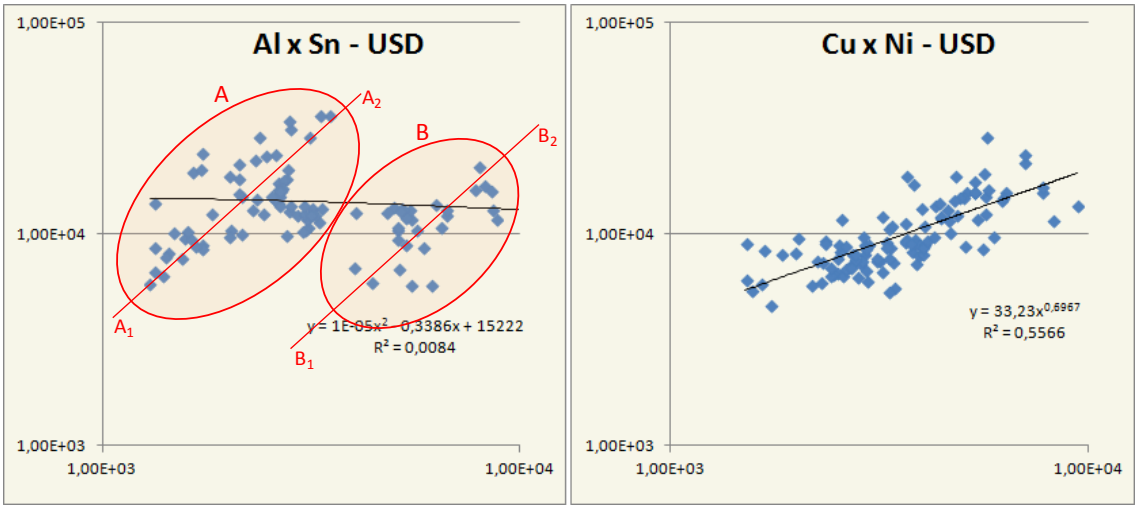


Figura 53 - *Scatter plots* da Figura 52 plotados em escala logarítmica (a-esquerda, b-direita)

Ao se observar, porém, a Figura 53a, é fácil perceber dois agrupamentos (*clusters*) destacados pelas elipses A e B. Verifica-se também que os eixos maiores das elipses, A_1-A_2 e B_1-B_2 tem a mesma declividade. Estes *clusters* são também conhecidos como atratores no estudo dos sistemas dinâmicos, correspondendo a regiões em torno das quais o sistema tende a se estabilizar. Uma das características de um sistema complexo é que pode sofrer mudanças de fase como resultado de uma perturbação, movendo-se para um novo atrator. Na Figura 54 utiliza-se o recurso de quantização da ferramenta de análise de complexidade que utiliza um gradiente de tonalidades para destacar as regiões de maior densidade de amostras (regiões

mais claras), para visualizar dois atratores mais fortes no caso do par Al-Sn, destacados pelas elipses amarelas.

Uma das vantagens da exploração dos dados por meio da análise de complexidade é a possibilidade de extrair acoplamentos mesmo a partir de dados com patologias (desvios da distribuição normal) como as expostas. No caso do alumínio, a existência de dois *clusters* cuja declividade das retas médias é semelhante, indica um fator de mercado subjacente comum e um outro fator condicionante adicional sobreposto que modifica a relação de preços entre o alumínio e o estanho em função dos atratores.

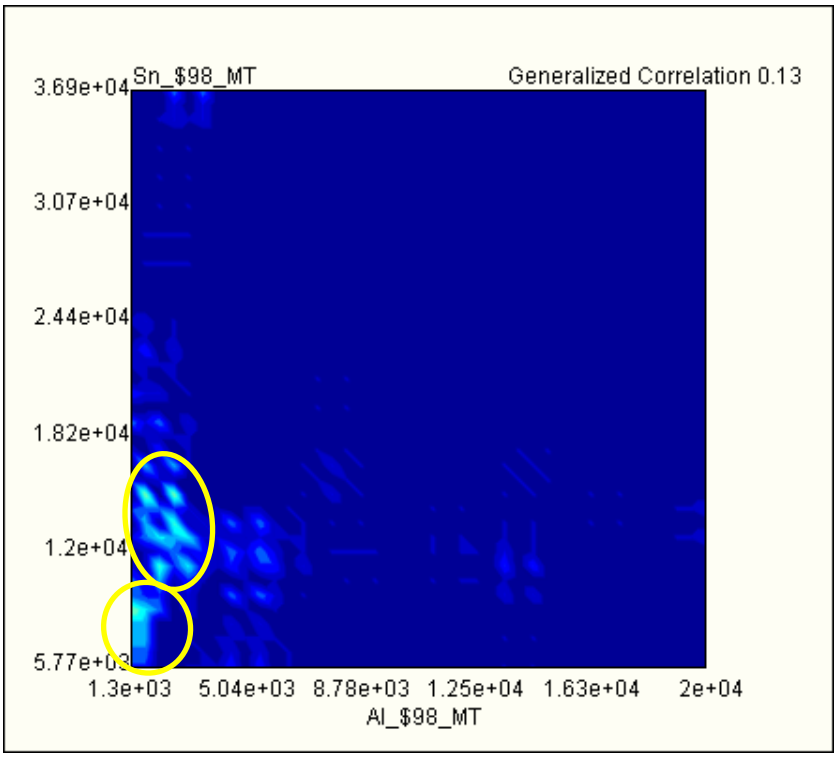


Figura 54 - Visualização "quantizada" do scatter plot da Figura 53a

A existência de clusters indica que a distribuição dos dados seja multimodal, ou seja, sua função de densidade de probabilidade apresenta mais de um pico. Antes do cálculo da complexidade, a ferramenta apresenta uma análise estatística preliminar dos dados. Esta análise inclui um cálculo de robustez dos dados, que utiliza a distância de Kolmogorov-Smirnov (K-S) entre a função Gaussiana canônica, calculada a partir da média e do desvio padrão de uma série de dados, e a função densidade de probabilidade da mesma série. A maior distância encontrada entre os dois conjuntos de dados é a distância K-S. Na Tabela 4 resumem-se algumas

informações desta pré-análise estatística para os dados com e sem inflação respectivamente identificados como USD e USD98.

Observando-se as duas colunas relativas à robustez das variáveis, percebe-se na primeira coluna, dos valores não expurgados da inflação, que a robustez se encontra na faixa de 60% a 70%, indicando que a distribuição dos dados não se ajusta bem à curva gaussiana, o que é de se esperar devido à assimetria introduzida pela inflação. Espera-se também que, uma vez expurgada a inflação, os valores de robustez aumentem e é o que acontece em todos os casos com exceção do alumínio. A robustez aumentou 40% em média para todas as variáveis (14% para o níquel) mas diminuiu 6% par ao alumínio. Isso indica que a baixa robustez do alumínio não provém da assimetria imposta pela inflação, mas tem outra origem.

Tabela 4 - Comparação dos ajustes à curva gaussiana (robustez) em moeda nominal (SD) e fixa (USD98) por *commodity*

Nº	Nome	USD			USD98		
		CoV	Robustez	Entropia	CoV	Robustez	Entropia
1	Al	64,57 %	67,70 %	1,71	83,83 %	63,70 %	1,42
2	Cu	121,19 %	63,10 %	1,24	40,27 %	87,76 %	1,91
3	Pb	110,38 %	63,58 %	1,32	30,08 %	94,54 %	2,11
4	Ni	144,06 %	66,66 %	1,01	40,80 %	76,03 %	1,69
5	Sn	112,46 %	62,48 %	1,46	43,17 %	81,49 %	1,77
6	Zn	113,46 %	58,65 %	1,14	36,73 %	88,47 %	1,51

Investigando a origem da baixa robustez no caso do Alumínio foi calculada sua distribuição de probabilidade, plotada juntamente com a do estanho, para efeito de comparação, na Figura 55 (a e b).

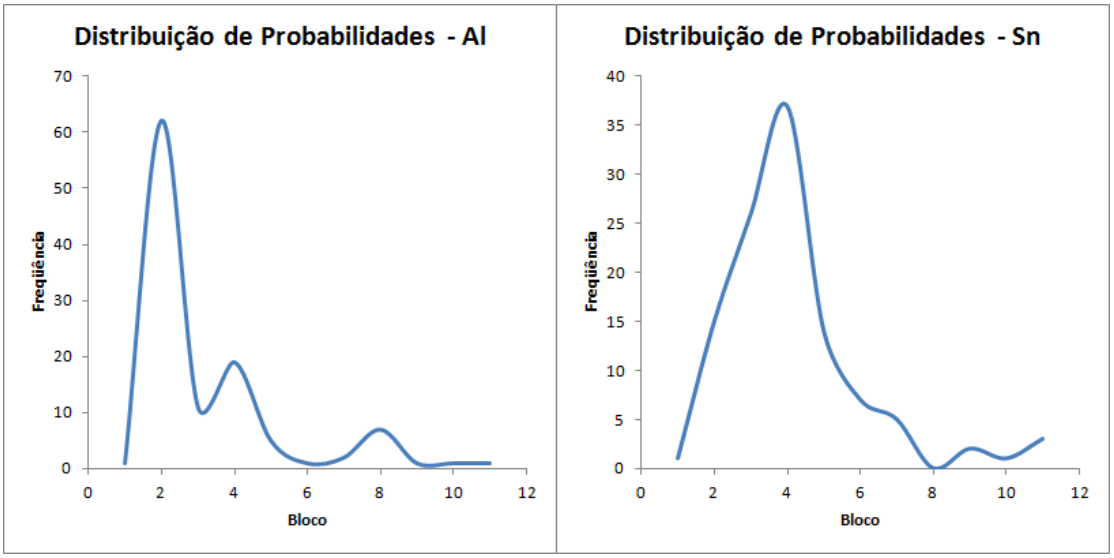


Figura 55 - Distribuição de probabilidades do Sn e do Al

Verifica-se, como antecipado, dois problemas na distribuição de probabilidades do alumínio, que a afastam da normalidade e contribuem para a baixa robustez apresentada. O primeiro se trata da "cauda longa" (*long tail*), assimetria ou obliquidade (*skewness*) comum a todos os metais analisados com exceção do chumbo[10], e especialmente pronunciada no caso do Alumínio. Este tipo de assimetria é causado pelos picos de preços que ocorrem com pouca frequência mas que têm altos valores relativos. O segundo problema é a multimodalidade, identificada anteriormente nos *scatter plots* e confirmada pela distribuição de probabilidade. A identificação das causas da multimodalidade encontra-se além do escopo desta pesquisa mas se trata de tema de interesse para pesquisas futuras.

Regime de câmbio

Ainda dentro do domínio da análise estática, pode-se comparar os dados disponíveis dividindo-os em três períodos distintos: 1900-1940, 1941-1970 e 1971-2007, conforme análise ilustrada na Figura 23 da seção 3.2.7. Esta análise evidenciou a redução da volatilidade no período de 1941 a 1970 devido ao regime de taxas de câmbio fixas de Bretton-Wood. Demonstra-se a seguir o impacto do regime de câmbio na complexidade do sistema composto pelas seis *commodities* metálicas.

Inicialmente observa-se na Figura 56 (a, b e c) os três mapas de sistema correspondentes aos três períodos distintos. Percebe-se de imediato a redução do

[10] Distribuições de probabilidade para todos os demais metais podem ser encontradas no Apêndice 1.

número de conexões no período do regime de câmbio de taxas fixas. A Tabela 5 permite comparar os números de complexidade nos três períodos.

Tabela 5 - Comparação dos ajustes à curva gaussiana (robustez) em moeda nominal (USD) por período

Período	1900-1940	1941-1970	1971-2010
Número de amostras	41	30	40
Número de modos	14	9	18
Complexidade Crítica	10,52	4,75	7,21
Complexidade Operacional	9,19	4,43	6,75
Robustez (%)	96,5	95,29	80,95

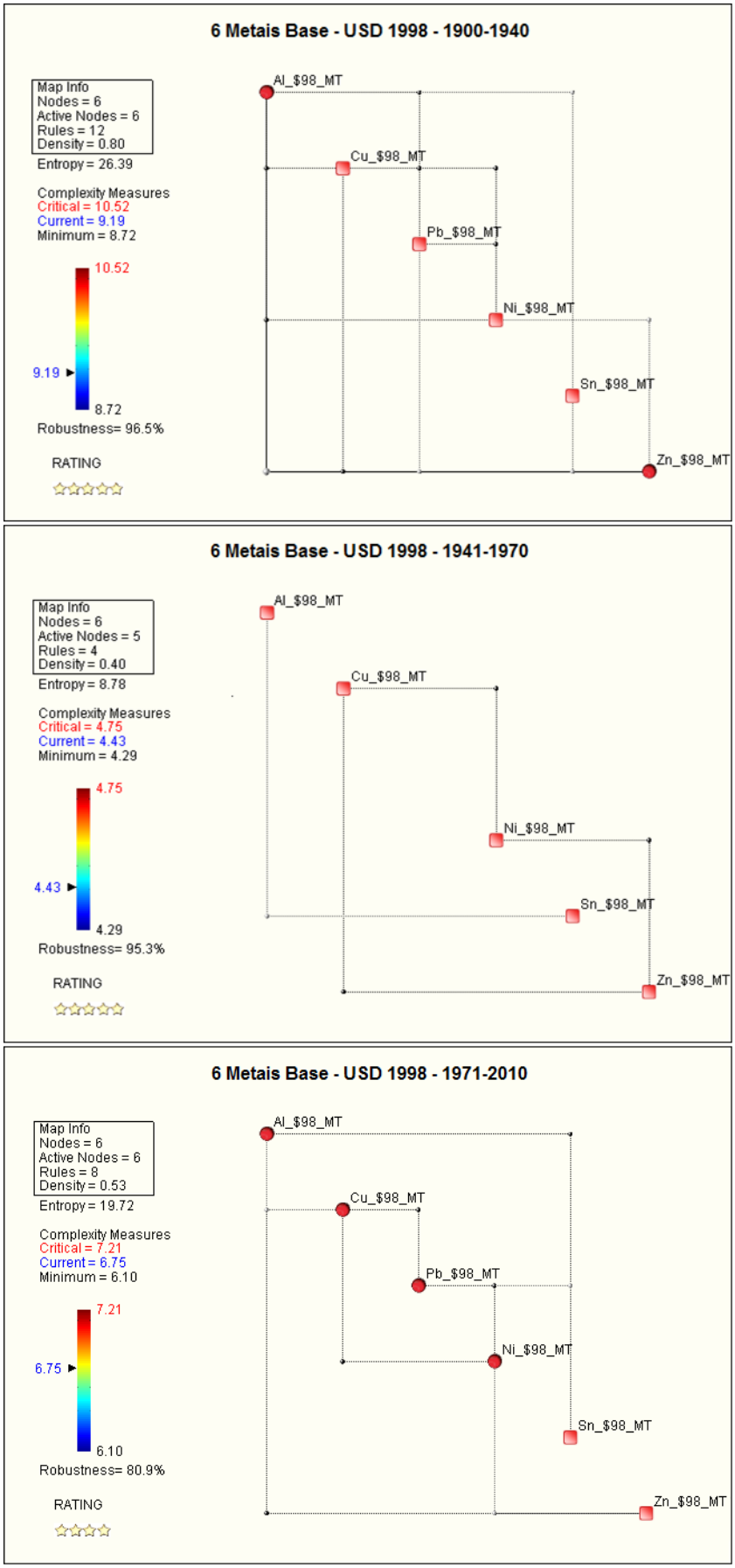


Figura 56 - Mapas dos sistemas de preços de 6 metais para 3 períodos: 1900-1940 (a-superior), 1941-1970 (b-centro) e 1971-2007(c-inferior)

Verifica-se o efeito da redução do número de conexões na consequente redução dos números de complexidade do período de câmbio fixo em relação aos demais. Com relação ao primeiro período a redução foi de aproximadamente 50%, mantendo-se o grau de robustez, ou seja, a estabilidade do sistema, praticamente no mesmo nível. Como as taxas de câmbio afetam todas as commodities em maior ou menor grau, criam desta forma acoplamentos entre variáveis que de outra forma não existiriam. A Tabela 6 apresenta as principais conexões por período. Os números apresentados em preto são as dez principais conexões em cada período e os em cinza claro foram introduzidos para completar a tabela e permitir a comparação.

Tabela 6 - Principais conexões por período e respectiva força

Pares de Variáveis		Força de Correlação		
		1900-1940	1941-1970	1971-2010
Al	Cu	0,57	0,24	0,48
Al	Ni	0,47	0,09	0,17
Al	Pb	0,43	0,12	0,40
Al	Sn	0,28	0,35	0,49
Al	Zn	0,37	0,18	0,51
Cu	Ni	0,68	0,43	0,59
Cu	Pb	0,70	0,12	0,56
Cu	Zn	0,51	0,37	0,44
Ni	Zn	0,42	0,47	0,32
Pb	Ni	0,44	0,14	0,50
Pb	Sn	0,29	0,25	0,48
Pb	Zn	0,40	0,28	0,35
Média		0,46	0,25	0,44
σ rel		29%	51%	26%

O que se percebe, com poucas exceções, é a redução da força de acoplamento para a quase totalidade dos acoplamentos no período de 1941 a 1970, o que fica claro quando se comparam as médias: 0,25 no período central contra 0,46 e 0,44 nos períodos inicial e final respectivamente. É interessante também observar o aumento do desvio padrão relativo no período central. Aqui a situação se inverte, com o período central apresentando 51% contra 29% e 26% nos períodos inicial e final respectivamente. A interpretação é a mesma utilizada no caso da inflação, ou seja, removendo-se o fator comum estruturante, nomeadamente a taxa de câmbio, as correlações se enfraquecem e as causas específicas de volatilidade das *commodities* passam a ter maior peso.

Finalmente, na Tabela 7 observa-se na linha das médias uma expressiva redução do coeficiente de variação do período central em relação aos demais, denotando a já observada redução da volatilidade dos preços no período. Nota-se também a redução da entropia de Shannon, que mede a quantidade de informação presente em uma determinada série de dados. A entropia de Shannon pode ser compreendida como a inviabilidade de um determinado conjunto de dados poder ser representado por um modelo determinístico. Pode ser entendida também como a quantidade de "ruído" presente na série de dados, "ruído" aqui compreendido como informação não estruturada.

Tabela 7 - Comparação da volatilidade (CoV) para os 3 períodos

Nº	Nome	1900-1940			1941-1970			1971-2010		
		CoV	Robustez	Entropia	CoV	Robustez	Entropia	CoV	Robustez	Entropia
1	Al	49,1%	68,7%	1,28	11,5%	88,9%	1,21	29,4%	84,8%	1,63
2	Cu	45,4%	87,8%	1,65	22,1%	91,9%	1,40	37,7%	84,9%	1,73
3	Pb	24,3%	93,2%	1,65	23,6%	83,7%	1,48	35,3%	84,5%	1,52
4	Ni	38,4%	70,7%	1,42	18,6%	88,9%	1,41	44,1%	82,6%	1,30
5	Sn	27,8%	92,6%	1,55	18,5%	90,7%	1,42	54,3%	75,3%	1,56
6	Zn	46,8%	83,6%	1,19	16,5%	85,4%	1,35	32,8%	87,2%	1,55
Média		38,6%	82,7%	1,46	18,4%	88,3%	1,38	38,9%	83,2%	1,55
σ rel		27,1%	10,7%	19,3%	4,3%	3,1%	9,2%	9,0%	4,1%	14,3%

A robustez dos dados, de um modo geral, é maior no período central. Exibe-se na Figura 57, a título de ilustração, as curvas de distribuição de probabilidade do alumínio para os três períodos.

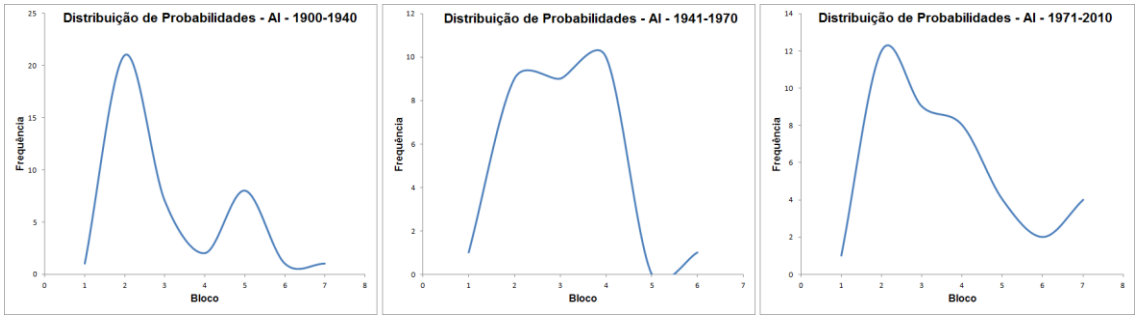


Figura 57 - Curvas de distribuição de probabilidade do alumínio para os três períodos

Verifica-se que a multimodalidade anteriormente identificada na distribuição dos preços do alumínio é proveniente principalmente do primeiro período (robustez=68,7%). No período central tem-se acentuada curtose mas a curva é mais

simétrica (robustez=88,9%). No período final, observa-se a obliquidade causada pelos picos de preços (robustez=84,8%).

Análise dinâmica

Na análise estática, realizada para o conjunto dos seis metais base, pode-se demonstrar como dois dos elementos citados na bibliografia consultada como influentes na volatilidade dos preços, as taxas de câmbio e a inflação, agem sobre a complexidade do sistema. De modo geral as conclusões são compatíveis entre os métodos estatísticos e de análise de complexidade.

Na análise dinâmica, se buscará compreender a evolução da complexidade do mercado no tempo, procurando identificar avisos prévios que indiquem instabilização. Como visto na revisão bibliográfica, uma variação brusca no valor da complexidade pode indicar a iminência de um evento traumático no sistema.

A análise dinâmica divide o período disponível em subperíodos de mesma duração, denominados janelas, e calcula a complexidade para cada um destes subperíodos. O número mínimo de amostras dentro de um período para que o cálculo da complexidade seja confiável é seis. As amostras disponíveis são anuais, pelo que ajustaremos a largura da janela em 10 amostras, calculando assim a complexidade em cada década. Pode-se alterar o passo de evolução da análise, de 1 até o número de amostras na janela (10).

Apresenta-se na Figura 58 a evolução dos valores de complexidade para o sistema em tela, utilizando 10 amostras por janela e passo 10, ou seja, sem sobreposição de janelas.

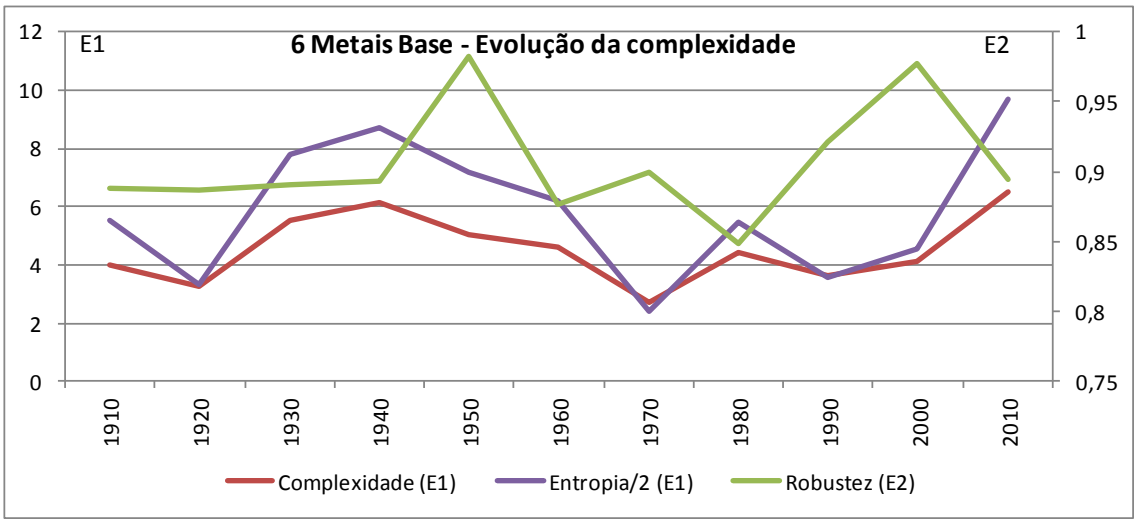


Figura 58 - Evolução da complexidade, entropia e robustez para o sistema de 6 metais

A complexidade é o resultado da composição de dois elementos básicos do sistema, sua estrutura e a entropia mútua entre seus componentes. Verifica-se na Figura 58 a concordância entre a curva de complexidade e a da entropia. Isto significa que a complexidade do sistema de seis metais base é controlada pela entropia (*entropy driven*) em muito maior grau do que pela estrutura, ou seja, pela interação e intensidade na troca de informações entre os componentes.

A entropia e a complexidade não são necessariamente prejudiciais a um sistema. Podem indicar apenas seu grau de funcionalidade e atividade. Por exemplo, um banco com muitas agências, produtos e clientes apresenta uma complexidade maior que outro de menor porte. A ameaça real é a distância entre as complexidades operacional e crítica, que se muito reduzida pode causar mudanças de fase repentinas ou até mesmo um colapso catastrófico do sistema. O inverso da distância entre as duas complexidades citadas é representada em forma de percentual pela grandeza denominada robustez.

O aviso prévio de uma crise potencial, portanto, deve combinar um período de complexidade crescente concomitante com robustez decrescente. Observando a Figura 58, este padrão é exatamente o que encontramos na primeira década deste século, na transição dos dados de 2000 para 2010. Neste período verifica-se uma redução de cerca de 10% da robustez simultaneamente com os aumentos de aproximadamente 60% e 110% respectivamente para a complexidade e a entropia. Tal período corresponde ao *boom* das *commodities* do início do milênio e também ao prelúdio da forte crise que se seguiu em 2009.

<u>O sistema níquel</u>

Os resultados do estudo dos metais base aplicam-se ao grupo como um todo, incluindo aí o níquel. Uma análise voltada mais especificamente para o níquel exigirá a delimitação de um “ecossistema” do níquel. Em se tratando de sistema complexo, as fronteiras de tal ecossistema poderão ser relativamente arbitrárias, dependendo do foco e da profundidade da análise. Na presente análise, serão incluídos elementos que, como visto na revisão bibliográfica e no estudo dos seis metais base, têm influência nos preços do níquel e portanto fazem parte de seu ecossistema, e para os quais se pode encontrar as séries históricas de valores

necessárias à análise de complexidade. Um conjunto inicial de variáveis será utilizado mas poderá ter alguns de seus elementos removidos, segundo o princípio da parcimônia (HANSEN; YU, 2001), dependendo da identificação de sua importância nos resultados da análise.

Serão utilizadas inicialmente as seguintes séries de dados, relacionadas a seguir juntamente com seus identificadores:

1) fatores específicos do mercado do níquel:
    - produção mundial, Ni_WRDPRD;
    - produção secundária (Estados Unidos como *proxy*), Ni_SECPRD;
    - estoques (Estados Unidos como *proxy*), Ni_STK;
    - preços do níquel a valores constantes, Ni_USD98;
    - preços do cromo a valores constantes, Cr_USD98;
    - preços do minério de ferro a valores constantes, Fe_USD98;
    - preços da sucata de aço inoxidável a valores constantes, SSSCR_USD92;
    - índice de produção de aço inoxidável, SS_IDX.

2) fatores globais:
    - produto interno bruto dos países (PIB ou *GDP*) responsáveis por 80% ou mais do consumo mundial de níquel (TROSKIEWICZ, 2011): China, Japão, Estados Unidos e Alemanha, respectivamente GDP_CHN, GDP_JPN, GDP_USA e GDP_GER;
    - taxa de câmbio entre os Estados Unidos e os países responsáveis por 80% ou mais da produção mundial de níquel: China, Rússia, Europa (Alemanha como *proxy* anteriormente ao Euro), Japão, Canadá e Austrália respectivamente, USD_CNY, USD_RUB, USD_EUR, USD_JPY, USD_CAD e USD_AUD;
    - índice de custo de energia, como *proxy* dos custos de produção, ENR_IDX.

As séries de dados citadas são originárias de diversas fontes e abrangem períodos variáveis. No caso dos dados específicos do níquel, com exceção do índice de produção do aço inoxidável, todos os demais provêm do USGS e estão

disponíveis desde 1900. As taxas de câmbio estão disponíveis desde 1990, o produto interno bruto desde 1950 e o índice de energia desde 1960.

Desta forma, serão realizadas análises em três períodos distintos, sacrificando-se a quantidade de elementos analisados pelo maior período de disponibilidade dos mesmos.

1º período - 1990 a 2011

O primeiro período a ser analisado é o que contém o maior número de variáveis, ou seja, o conjunto completo de fatores globais e específicos.

Iniciando pela análise estática, apresenta-se a na Figura 59 o mapa do sistema e principais acoplamentos.

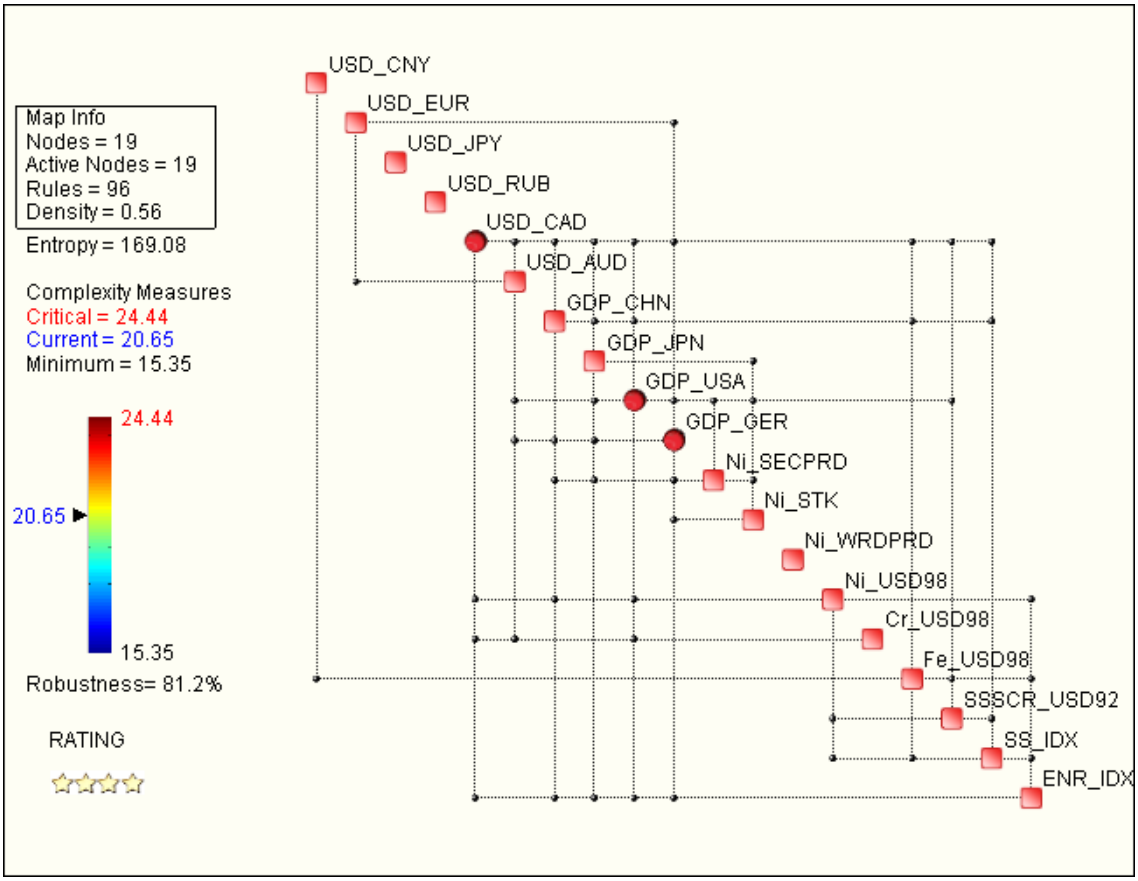


Figura 59 - Mapa para o "sistema níquel", no período de 1990 a 2011

Chama atenção a densidade do mapa, com todos os seus nós (variáveis) ativos e um total de 96 regras (acoplamentos) descobertas. Para efeito de clareza, apenas os acoplamentos de maior força são exibidos no mapa, o que pode deixar alguns elementos órfãos na diagonal principal caso só participem de acoplamentos

fracos. A complexidade operacional está a uma distância razoável da crítica, redundando em uma robustez de 81,2% que denota boa estabilidade do sistema.

Na diagonal pode-se ver 3 variáveis em destaque, USD_CAD, GDP_USA e GDP_GER. Estas variáveis são as que apresentam o maior número de conexões com outras variáveis e são denominadas *hubs*. As variáveis *hub* têm como característica principal a rápida propagação de perturbações por elas sofridas para os demais componentes do sistema. No caso da taxa de câmbio entre o dólar norte americano e o canadense a explicação não parece ser imediata mas no caso dos PIBs dos Estados Unidos e Alemanha, suas conexões indicam claramente a dependência do sistema das mesmas.

Na Tabela 8 são exibidas as 10 conexões entre variáveis com as maiores forças de correlação (FC), extraídas do mapa da Figura 59. Com apenas uma exceção, todas as demais envolvem variáveis *hub*, destacadas em vermelho.

Tabela 8 - Principais conexões do mapa da Figura 59

Variável 1	Variável 2	FC
GDP_GER	Ni_WRDPRD	0.73
GDP_JPN	Ni_WRDPRD	0.66
GDP_USA	Ni_WRDPRD	0.64
GDP_JPN	GDP_GER	0.75
GDP_USA	GDP_GER	0.72
GDP_JPN	GDP_USA	0.66
GDP_CHN	GDP_GER	0.65
GDP_USA	Ni_STK	0.67
USD_CAD	GDP_GER	0.73
USD_CAD	GDP_JPN	0.66

Três grupos destacados em cinza despertam maior interesse. O primeiro grupo demonstra a vinculação da produção mundial de níquel (Ni_WRDPRD) diretamente ao desempenho das economias da Alemanha (GDP_GER), Japão (GDP_JPN) e Estados Unidos (GDP_USA), como exemplificado pelo *scatter plot* das correlações entre GDP_GER e Ni_WRDPRD na Figura 60 d. O segundo grupo ilustra o forte acoplamento entre as economias dos Estados Unidos, Alemanha e Japão e, em menor grau mas ainda alto, entre a China (GDP_CHN) e a Alemanha. As forças de correlação entre China e Estados Unidos e China e Japão, embora não exibidas na tabela, são de 0,50 e 0,45 respectivamente. *Scatter plots* das correlações entre

GDP_JPN e GDP_GER e entre GDP_JPN e GDP_USA as mostradas nas Figura 60 a e b respectivamente. O terceiro grupo ilustra o acoplamento entre o desempenho da economia norte americana e os estoques de níquel norte americanos. Neste caso, temos uma relação reversa, como ilustrado na Figura 60 c.

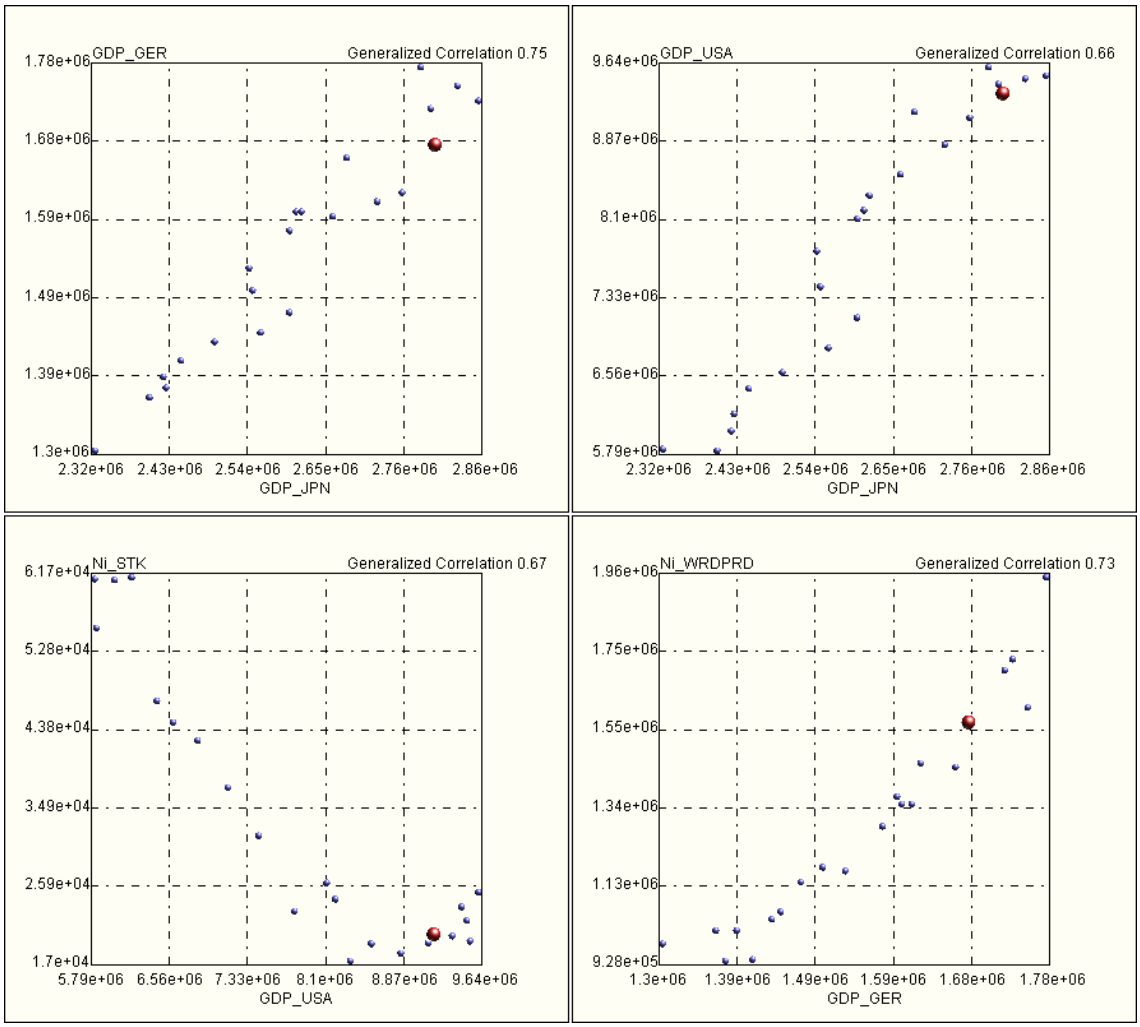


Figura 60 - Exemplos de scatter plots para as principais conexões do mapa: GDP_GER x GDP_JPN (a-sup.esq.), GDP_USA x GDP_JPN (b-sup.dir.), Ni_STK x GDP_USA (c-inf.esq.) e Ni_WRDPRD x GDP_GER (d-inf.dir.)

A análise dinâmica, como anteriormente mencionado, precisa de um mínimo de 6 amostras na janela móvel para que o cálculo da complexidade seja confiável. No caso do primeiro período, temos apenas 19 amostras, o que permite apenas 3 janelas com 6 amostras em cada uma. Desta forma, é necessário utilizar o recurso de sobreposição de forma que a janela móvel de 6 amostras se desloque apenas uma amostra por vez, obtendo assim 18 janelas disponíveis. Apresenta-se o

resultado da análise na Figura 61, exibindo a complexidade (a), entropia (b) e robustez (c).

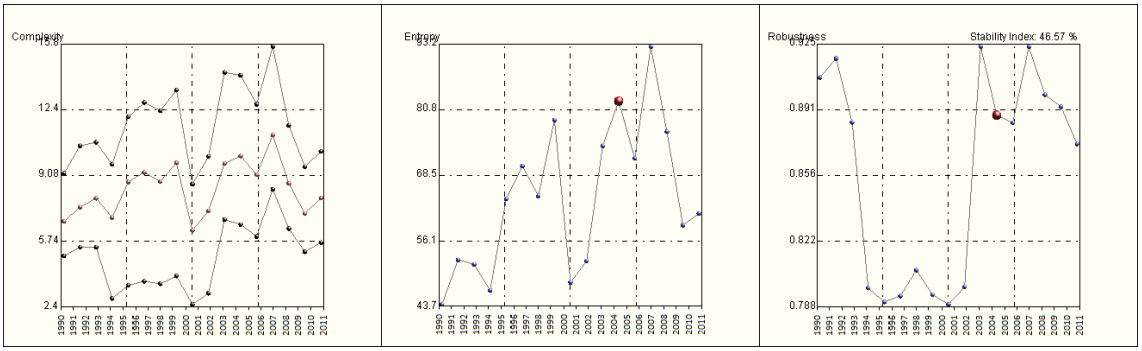


Figura 61 - Evolução da complexidade (a-esquerda), entropia (b-centro) e robustez (c-direita) para o "sistema níquel"

Percebe-se um padrão semelhante ao da análise feita para os metais base, com a diferença de que a robustez não é decrescente no período de 2000 a 2007 mas sim no período de 2003 a 2006. Esta diferença pode advir da forte estrutura do subsistema de PIBs que apresenta 99% de robustez. Removendo-se o subsistema de PIBs da análise obtemos as curvas da Figura 62, que com exceção da robustez no período de 1995 a 2002 são muito semelhantes às da Figura 61 referente ao sistema completo, obtendo-se o mesmo resultado ao se remover o subsistema de taxas de câmbio, pelo que não será exibido.

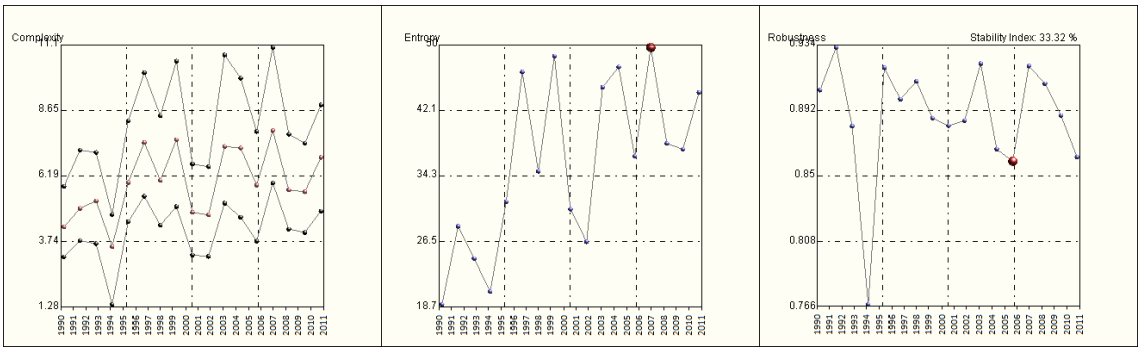


Figura 62 - Evolução da complexidade (a-esquerda), entropia (b-centro) e robustez (c-direita) para o "sistema níquel" sem os PIBs

Finalmente, analisando-se unicamente as variáveis relacionadas aos fatores específicos do mercado do níquel, observa-se novamente o resultado obtido na análise dos metais base, ou seja, complexidade e entropia crescentes e robustez decrescente no período de 2000 a 2007 e o colapso do sistema caracterizado pela brusca redução de complexidade e entropia em 2008, como se vê na Figura 63. A

interpretação é de que a inserção das variáveis globais, embora útil no estudo das correlações estáticas, interferem com sua estrutura própria no cálculo da complexidade do sistema do níquel, o qual tem em seus preços e demais variáveis suficiente informação para tal cálculo. Desta forma, pelo princípio da parcimônia, deixam-se de lado as variáveis globais nesta análise.

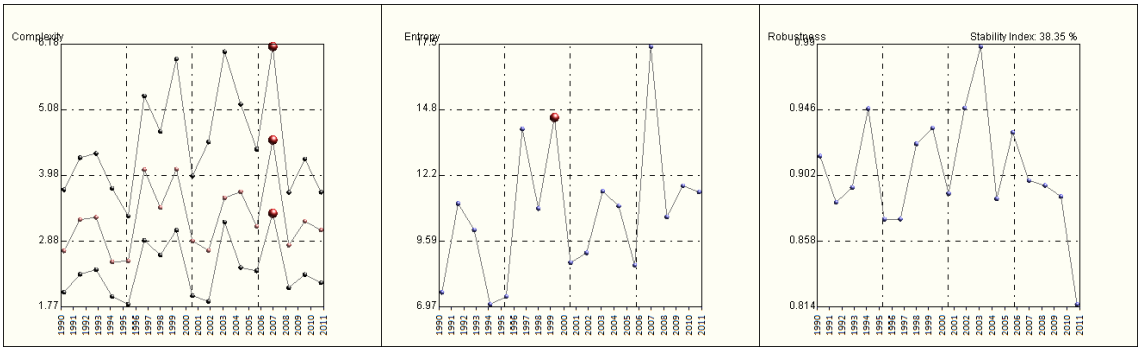


Figura 63 - Evolução da complexidade (a-esquerda), entropia (b-centro) e robustez (c-direita) para o "sistema níquel" sem as variáveis globais

Procurou-se reduzir ainda mais o número de variáveis, retirando-se do sistema por etapas, as variáveis de produção (Ni_SECPRD e Ni_WRDPRD), a de estoque (Ni_STK), as dos outros metais (Cr_USD98 e Fe_USD98) e as relativas a preços de aço inoxidável e sua sucata (SS_IDX e SSSCR_USD92). Em todos os casos a degradação do sistema foi clara, de forma que o sistema formado pelo conjunto de dados específicos do níquel é o mínimo que mantém sua funcionalidade.

Deve-se ter presente que se está trabalhando em condições limitadas pela baixa quantidade de amostras disponíveis, sendo conveniente reavaliar estes resultados com dados de maior frequência, mensais, semanais ou mesmo diários.

2º período - 1950 a 2011

A análise global neste período se restringe aos dados macroeconômicos de PIB, de custo da energia e os específicos do níquel mas sem os dados de aço inoxidável e sua sucata.

É possível identificar na Figura 64 os mesmos padrões já identificados para o *boom* do milênio e sua subsequente crise. Há porém uma nova característica, um pico de complexidade centrado em 1976 com subsequente queda tanto na complexidade quanto na robustez. Aqui, podemos verificar que a complexidade

começou a aumentar após 1970, englobando inicialmente a segunda crise do petróleo, em 1973, a greve em Sudbury que reduziu em 40% a produção mundial do níquel, em 1978 e 1979, seguindo-se a entrada do níquel na LME em 1979 e, em função da terceira crise do petróleo, no mesmo ano, a recessão de 1981-1982.

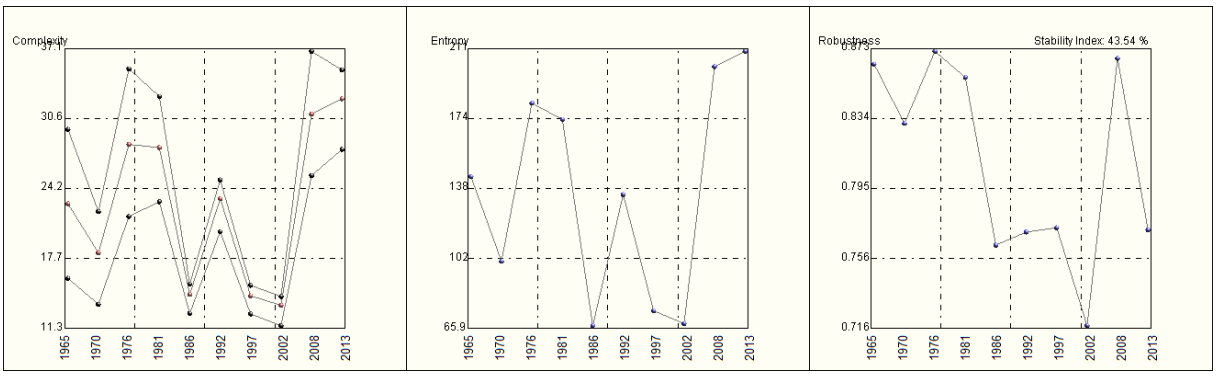


Figura 64 - Evolução da complexidade (a-esquerda), entropia (b-centro) e robustez (c-direita) para o "sistema níquel" no período de 1950 a 2011

Como os motivos da desorganização do mercado do níquel não são devidos a problemas sistêmicos internos mas a greves, a mudanças na política de precificação e a crises de energia, não houve um aviso prévio do evento, no qual se pudesse identificar aumento de complexidade e entropia ou ainda queda de robustez anteriormente à instalação da crise. Por outro lado, depois de instalada, foi possível identificar sua "assinatura" - aumento de complexidade e entropia e redução de robustez - inclusive com a indicação de que esta crise possa ter tido um impacto na organização do mercado do níquel equivalente ao da crise de 2009, a se considerar a magnitude do aumento de complexidade causado pela entropia.

Exibe-se na Figura 65 a evolução da complexidade e da entropia sobrepostas aos preços do níquel no período de 1965 a 2013. Os indicadores de complexidade tiveram seus valores suprimidos e suas escalas ajustadas a uma melhor compreensão da informação.

Devido à resolução de seis amostras (anuais) no cálculo dos indicadores de complexidade, apesar de se poder identificar o aumento brusco da complexidade no período de 2002 a 2008, isto só foi possível neste caso após os dados deste período terem sido disponibilizados e os respectivos cálculos terem sido executados. Para que os indicadores de complexidade sejam úteis como avisos prévios de

instabilização é necessário que possam ser calculados com antecedência o que exige uma frequência maior em sua apuração.

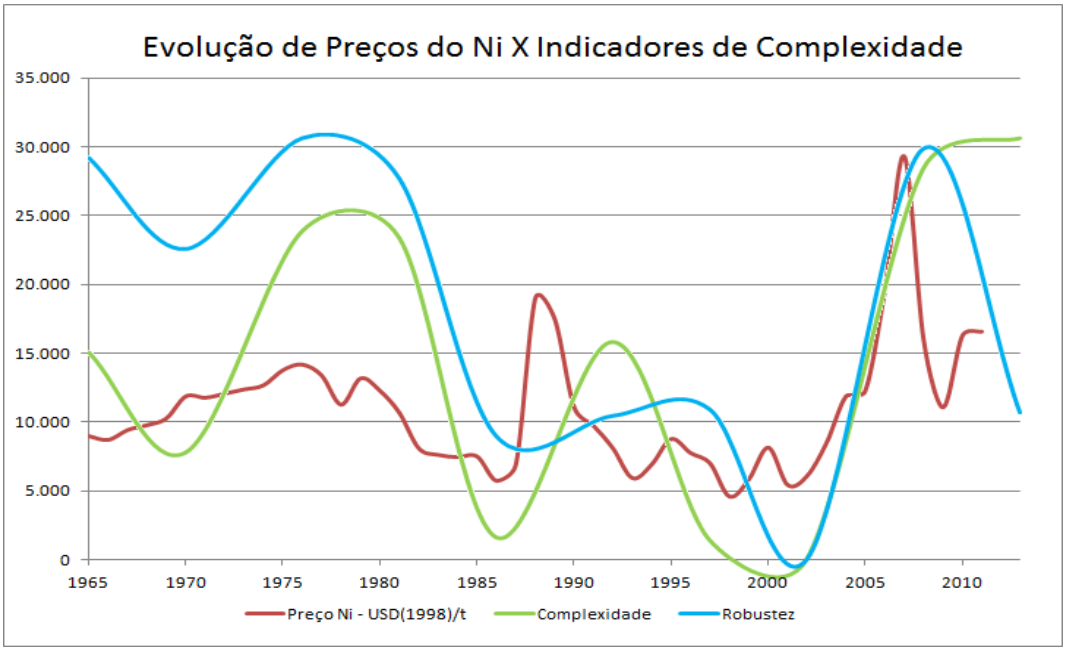


Figura 65 - Preços anuais do Ni, complexidade e robustez, de 1950 a 2011

Pode-se obter uma maior frequência com as próprias amostras anuais utilizando-se o recurso de sobreposição de amostras oferecido pelo *software,* pelo qual ao invés de se avançar seis amostras a cada janela de cálculo, avança-se todo o bloco de seis amostras apenas um ano, ou seja, o bloco de amostras seguinte ao de 2000-2005 será 2001-2006 e não 2006-2011. Assim, os indicadores serão calculados a cada ano com informações dos últimos seis anos, o que embora possa amortecer as variações, permite identificá-las mais cedo.

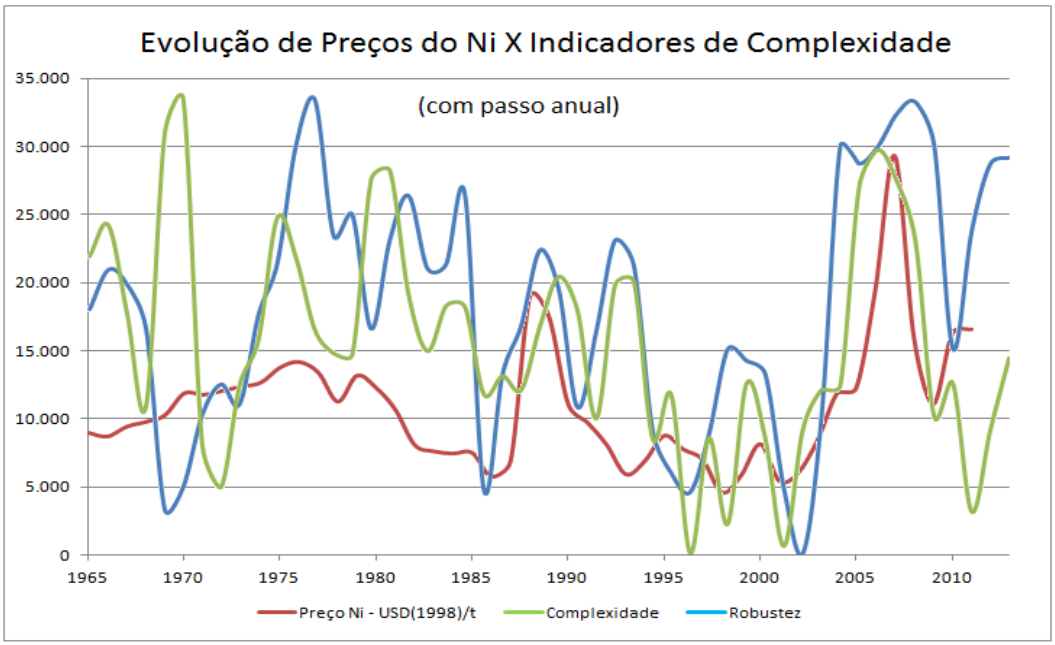


Figura 66 - Mesmos dados da Figura 65 porém com sobreposição de janelas

A Figura 66 ilustra a situação descrita, na qual se pode perceber a sinalização antecipada em relação ao gráfico da Figura 65. A antecipação permite que o aumento brusco da complexidade seja percebido já no período de 2002 a 2003. Pode-se observar também que logo após a inflexão da curva de robustez, tem lugar o colapso do sistema.

Outra forma de se obter maior resolução na análise é utilizar amostras coletadas mensalmente. A Figura 67 exibe a evolução dos indicadores de complexidade utilizando-se uma janela de seis amostras mensais, sem sobreposição. As linhas finas são os valores obtidos para cada semestre. Como se pode observar, não há como extrair qualquer informação útil a partir destas linhas devido à extrema oscilação na evolução dos dados. É necessário um processamento adicional para se extrair a tendência global dos indicadores.

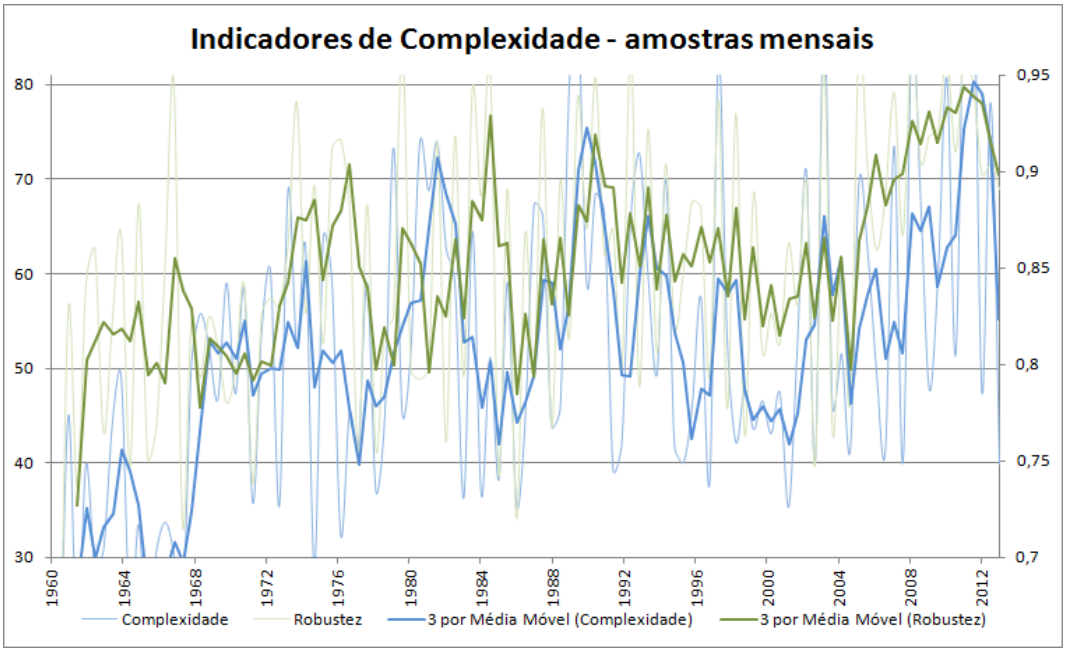


Figura 67 - Complexidade e robustez usando dados mensais do "sistema níquel", de 1950 a 2011, com respectivas médias móveis

A solução mais imediata é a utilização de um "filtro passa-baixas", expressão originária da tecnologia de processamento de sinais que nada mais é do que um dispositivo que amortece as oscilações de alta frequência mas que permite a passagem das de baixa frequência. Há várias formas de se implementar tal filtro, sendo a mais simples a utilização de uma média móvel. As linhas mais grossas exibidas no gráfico são das respectivas médias móveis de 3 amostras das linhas mais finas de mesma cor. Observando-se as médias móveis, percebe-se então que é possível perceber um aumento de complexidade e da robustez a partir de 2004 e que, novamente, o sistema entra em colapso após o ponto de inflexão da curva de robustez, mas apenas em 2011. Assim, caso se deseje utilizar dados mensais com janelas de poucas amostras, será necessário pesquisar uma melhor forma de filtragem dos dados.

6 CONCLUSÃO

Em resumo, com base nos resultados obtidos, pode-se concluir que:

- Utilizando-se o cálculo de entropia mútua é possível extrair acoplamentos, entre variáveis que não são passíveis de regressão estatística, como no caso do par Sn x Al em um sistema composto por uma cesta de metais básicos. Isto representa um ganho na extração de conhecimento do sistema a partir de seus dados.
- Fatores como inflação e taxa de câmbio que afetam simultaneamente um conjunto de commodities criam acoplamentos artificiais entre estes componentes do “sistema mercado”;
- Utilizando-se as forças de correlação foi possível identificar relações entre os principais players do mercado com a produção e os estoques de Ni;
- Foi possível identificar a instabilização do mercado que antecedeu a crise de 2008/2009 por meio do aumento de complexidade do mercado do níquel (bem como de outras *commodities*). Esta instabilização poderia ter sido identificada com dados disponíveis anteriormente ao colapso, tendo assim função de aviso prévio;
- A antecipação de crises por meio dos indicadores de complexidade só é possível nos casos em que as causas do aumento de complexidade ou entropia são internas ao sistema.

Os dados utilizados neste trabalho são de acesso público e, portanto, podem ter sofrido distorções em função de questões de políticas de sigilosidade, de comunicação e de marketing de seus divulgadores. Uma sugestão para continuidade da pesquisa é a utilização de relatórios de empresas especializadas, os quais possuem informação bem estruturada e em excelente nível de detalhe, específicos para a *commodity* de interesse, não utilizados neste trabalho por serem de interesse específico e, desta forma, fugirem dos objetivos desta pesquisa que visou comprovar a aplicação de uma nova ferramenta numa aplicação inovadora, qual seja, o estudo de mercado de *commodities* minerais, e não conduzir um estudo aprofundado sobre

um metal específico (níquel) que neste trabalho foi apenas usado como estudo de caso.

Em outra direção, métodos de *data mining* e *knowledge discovery* podem ser utilizados em conjunto com a análise de complexidade em grandes conjuntos de dados, na busca do conhecimento que, pacientemente, aguarda seu descobridor.

7 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALL METALS & FORGE GROUP, Stainless steel, 2009. Disponível em: http://www.steelforge.com/ferrous/stainlesssteel.htm. Acesso em: 10 outubro 2011.

ALONSO E. Material scarcity from the perspective of manufacturing firms : case studies of platinum and cobalt. PhD thesis, Massachusetts Institute of Technology, 2010.

ALQUIST, R.; COIBION, O. The Comovement in Commodity Prices: Sources and Implications, IMF Working Paper 13/140. Jun. 2013.

ARTHUR, W. B. Complexity and the Economy, Science v. 284, n. 5411, p. 107-109, Apr 1999. DOI:10.1126/science.284.5411.107

ATHANASOPOULOS, G.; GUILLÉN, O. T. C.; Issler J. V.; Vahid F. Model selection, estimation and forecasting in var models with short-run and long-run restrictions. Journal of Econometrics 164 (1), 116 a 129. 2011.

BAK, P. How nature works. New York: Springer-Verlag 1996.

BARNETT, H. J.; MORSE, C. Scarcity and growth; the economics of natural resource availability. Resources for the Future, Washington: Johns Hopkins Press, 1963.

BARSKY, R. B.; LUTZ K. Do We Really Know that Oil Caused the Great Stagflation? A Monetary Alternative, NBER Macroeconomics Annual 2001, Maio 2002, p. 137-183., 2002.

BOLDT, J. R. J.; QUENEAU, P. The winning of nickel. Princeton: D. Van Nostrand Co., Inc., 1967. p. 61-65.

BOSECKER, K. Leaching of lateritic nickel ores with heterotrophic microorganisms. In: Fundamental and Applied Biohydrometallurgy. Proceedings 6th International Symposium on Biohydrometallurgy, Vancouver, Canada, August 21-24, 1985. Elsevier. 1986.

CAMMEN, L. Alloy steels. In: PRINCIPLES of metallurgy of ferrous metals. New York: American Society of Mechanical Engineers, 1928. Chap. 6, p. 142–156.

CARTMAN, R. Nickel pig iron - A long term solution? 3rd Euronickel Conference. Helsinki: Hatch, 2012.

CASTI, J. Complexification : Explaining A Paradoxical World Through the Science of Surprises. London: Harper Collins, 1994.

CHEN, M. H. Understanding World Metals Prices – Returns, Volatility and Diversification. Resources Policy n. 35, p. 127-40, 2010.

CHEN, M.; CLEMENTS, K.W. Patterns in world metals prices. Business School University of Western Australia, DISCUSSION PAPER 12.08

CHOE, B. J. The metals price boom of 1987-89: the role of supply disruptions and stock changes. Washington, DC: The World Bank. International Economics Dept., 1990.

COMPLEX SYSTEMS ENGINEERING , INC Jacek Marczyk. Process for the creation of fuzzy cognitive maps from Monte Carlo simulation generated Meta Model. US Patent No. US 7,580,903 B2. 25 Aug 2009.

COURIERMAIL BHP Billiton is happy to offload Ravensthorpe nickel project, 2009. Disponível em: http://www.couriermail.com.au/news/bhp-billiton-is-happy-to-offload-ravensthorpe-nickel-project/story-e6frergx-1225808829899. Acesso em: 8 novembro 2010.

CRUNDWELL, F. K.; MOATS, M. S.; RAMACHANDRAN, V.; ROBINSON, T. G.; DAVENPORT, W. G. Upgrading of laterite ores. Extractive Metallurgy of Nickel, Cobalt and Platinum Group Metals. 1st ed. Oxford: Elsevier, 2011. p. 39–47.

DARBELLAY, G. Predictability: an Information-Theoretic Perspective. In: Signal Analysis and Prediction. Boston: Birkhauser, 1998. p. 249-262.

DAVIS, H.W. Nickel. In: Metals and minerals, U.S. Bureau of Mines Minerals Yearbook 1953, v. 1, p. 837–853, 841, 1956.

DAVUTYAN, N.; ROBERTS, M. C. Cyclicality in metal prices. Resources Policy, v. 20, n. 1, p. 49-57, March 1994. DOI: 10.1016/0301-4207(94)90040-X.

DOMPIERI, M.; SZNELWAR J. J.; SCALABRIN, R. Perfil de abrasivos. Brasília: Ministério das Minas e Energia, 2009. (Relatório técnico 73. Projeto Estal). Relatório apresentado à JMendo Consultoria.

DRY, M.; HARRIS, B. Nickel Laterite and Three Mineral Acids. ALTA 2012, Perth, 2012.

DURLAUF, S. The new Palgrave dictionary of economics. 2nd ed. New York: Palgrave Macmillan, 2008.

EBRAHIMI, N.; MAASOUMI, E.; SOOFI, E. Ordering univariate distributions by entropy and variance. Journal of Econometrics, v. 90, n. 2, p. 317-336, 1999.

ENGLE, R. F.; ISSLER, J. V. Estimating common sectoral cycles. Journal of Monetary Economics v. 35, n. 1, p. 83-113, 1995.

ENGLE, R. F.; KOZICKI, S. Testing for common features. Journal of Business and Economic Statistics v. 11, n. 4, p. 369-380, 1993.

GLENCOREXSTRATA Annual Report 2013. Disponível em: http://www.glencore.com/assets/investors/doc/reports_and_results/2013/GLEN-2013-Annual-Report.pdf. Acesso em 15 janeiro 2014.

GÖDEL, K. “Über formal unentscheidbare Sätze der Principia Mathematica und verwandte Systeme I” with page-facing English translation, In: FEFERMAN, S. et al. (Ed.). Kurt Gödel: collected works. vol. I.,Oxford: University Press 1986. (*usar o título em inglês) – nota – trad. do orig. em alemão... opcional – ver dedalus.usp.br

GOLDENFELD, N.; KADANOFF L. P. Simple Lessons from Complexity, Science, v. 284, n.5411, p. 87-89, Apr 1999. DOI:10.1126/science.284.5411.87.

GRANGER, C; LIN, J. Using the mutual information coefficient to identify lags in nonlinear models. Journal of Time Series Analysis, v. 15, n. 4, p. 371-384, 1994.

GREEN, D. G.; NEWTH, D. Towards a theory of everything? Grand challenges in complexity and informatics. Complexity International, v. 8, p. pp-pp?, 2002.

GREENAWAY, D.; MORGAN C. W. The Economics of Commodity Markets. Cheltenham: Edward Elgar, 1999.

HALL, A.M. Nickel in iron and steel: New York: John Wiley & Sons, Inc., 595 p., 1954. p. 17-44.

HANSEN, M. H.; YU, B. Model Selection and the Principle of Minimum Description Length: Review paper. Journal of the American Statistical Association v. 96, n. 454, p. 746–774, June 2001. DOI:10.1198/016214501753168398

HART O.; KREPS, D. Price destabilizing speculation. The Journal of Political Economy, v. 94, n. 5, p. 927, 1986.

HAWKING, S. O universo numa casca de noz. 2. ed. São Paulo: Mandarim, 2002.

HECQ, A.; PALM, F.; URBAIN, J. Common cyclical features analysis in var models with cointegration. Journal of Econometrics v. 132, n. 1, p. 117-141, 2006.

HESS, F.L. Nickel. In: Mineral resources of the United States, 1915. U.S. Geological Survey, 1917. pt. 1, p. 743–766.,

HOATSON, D.M.; JAIRETH, S.; JAQUES, A.L. Nickel sulfide deposits in Australia—Characteristics, resources, and potential. Ore Geology Reviews v. 29, p. 179 -187, 234-235, 2006.

INCO LTD. Annual report-1979. Toronto: Inco Ltd., 1980. p. 4-9.

INTERNATIONAL MOLYBDENUM ASSOCIATION (IMA) Practical guidelines for the fabrication of duplex stainless steels. London, 2009. p. 8-9.

INTERNATIONAL MONETARY FUND (IMF). World Economic Outlook: Growth resuming, dangers remain. Chap. 1, p. 1-47, April 2012.

INTERNATIONAL NICKEL STUDY GROUP (INSG) World nickel statistics. The Hague: International Nickel Study Group, 1998, v. 8, n. 11, p. 64-66.

INTERNATIONAL NICKEL STUDY GROUP (INSG). Site institucional. Estatísticas do níquel e outros informes. Disponível em http://www.insg.org/. Acesso em: 11 agosto 2011.

ISSLER, J. V.; VAHID, F. Common cycles and the importance of transitory shocks to macroeconomic aggregates. Journal of Monetary Economics v. 47, n. 3, p. 449-475, 2001.

ISSLER, J. V.; VAHID, F. The missing link: using the NBER recession indicator to construct coincident and leading indices of economic activity. Journal of Econometrics v. 132, n. 1, p. 281-303, 2006.

JERRETT, D.; CUDDINGTON, J. Broadening the statistical search for metal price super cycles to steel and related metals. Resources Policy v. 33, n. 4, p. 188-195, 2008.

JOSLYN, C.; ROCHA, L. Towards semiotic agent-based models of socio-technical organizations. In: Conference on AI, simulation and planning in high autonomy systems, Tucson, Arizona, 2000. Proceedings p. 70-79, 2000.

KAUFMANN, S.A. The Origins of Order: self-organization and selection in evolution. New York: Oxford University Press, 1993.

KRAUTKRAEMER J. K. Nonrenewable resource scarcity. Journal of Economic Literature v. 36, n. 4, p. 20-65, 1998.

KYLE, J. Nickel Laterite Processing Technologies – Where To Next? ALTA 2010, Perth, 2010.

LABYS, W. C.; LESOURD, J. B.; BADILLO, D. The Existence of Metal Price Cycles. Resources Policy n.24, p. 147-55, 1988.

LANGTON, C. Life at the Edge of Chaos, Proceedings Artificial Life II, p.41-91, Addison-Wesley, 1991.

MARCZYK, J., A New Theory of Risk and Rating. Trento: Editrice Uniservice, 2009.

MCCUTCHEON, B. Nickel. Canadian Overview 2005, Ottawa, p. 38/11-38/12, May 2006.

MORRELL, L.G. The mineral industry of Canada, in Area Reports–International. U.S. Bureau of Mines Minerals Yearbook 1969, v. 4, p. 163–181, 1971.

National Institute of Standards and Technology (NIST) NIST/SEMATECH e-Handbook of Statistical Methods, 2012. Disponível em: http://www.itl.nist.gov/div898/handbook/. Acesso em 23 março 2014.

NUTTING, J. Metals as Materials. Metals and Materials July/August, p. 30-34,1977.

PINDYCK, R. S.; J. J. ROTEMBERG The excess co-movement of commodity prices. The Economic Journal, v. 100, n. 403, pp. 1173-1189, 1990.

PLUNKERT, P. Metal prices in the United States through 1998. Washington DC: U.S. Dept. of the Interior U.S. Geological Survey, 1999.

RADETZKI, M.; TILTON J. E. Conceptual and methodological issues. In: Tilton, J. E. (Ed.). World metal demand: trends and prospects. Washington, D. C.: Resources for the Future, 1990. p. 13-34.

REES, J. Natural resources : allocation, economics, and policy. London, New York: Methuen, 1985.

REUTERS Goro nickel mine still delayed - Vale, 2010. Disponível em: http://www.reuters.com/article/2010/04/21/vale-goro-idUSN2121626920100421. Acesso em: 18 junho 2011

Revista Brasil Mineral, n. 264, p. 43, jul 2007.

Revista Brasil Mineral, n. 264, p.38, jul 2007.

RIND D. Complexity and Climate. Science, v.284, n. 5411, p. 105-107, April 1999. DOI:10.1126/science.284.5411.105

RUDOLF WOLFF & CO. LTD. Nickel. In: Wolff's guide to the London Metal Exchange. 5th ed. Surrey: Metal Bulletin Books Ltd., 1995. Chap. 15, p. 127–133.

RUTHERFORD, D. Routledge dictionary of economics. 2nd ed. London: Routledge, 2002

RUTHERFORD, D. Routledge dictionary of economics. 2nd ed. London: Routledge, 2002

Science Magazine, v. 284, n. 5411. Disponível em: http://www.sciencemag.org/content/284/5411.toc. Acesso em: 2 agosto 2011.

SCOTT, A. (Ed.). Encyclopedia of nonlinear science. New York: Routledge, 2005. p.viii

SHANNON, C. E. A Mathematical Theory of Communication. Bell Systems Technical Journal, 1948, n. 27, p. 379-423, 623-656.

SLADE, M. E. Pricing of metals. Centre for Resource Studies, Queen's University, Kingston, 1988.

SLADE, M. E. Trends in natural-resource commodity prices: An analysis of the time domain. Journal of Environmental Economics and Management, v. 9, n. 2, p.122-137, 1982.

SULLIVAN D. 20th century U.S. mineral prices decline in constant dollars. Reston: U.S. Dept. of the Interior, U.S. Geological Survey, 2000.

TIETENBERG, T. H. Environmental and natural resource economics. New York: HarperCollins Publishers, 2009.

TILTON J. E. The future of recycling. Resources Policy v. 25, n. 3, p. 197-204, 1999.

United Nations. World population to 2300. New York: United Nations, 2004.

TORRIES, T. F. Evaluating Mineral Projects: Applications and Misconceptions . Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc., 1998.

TROSKIEWICZ A. Table of the world's 10 biggest consumers of refined nickel in 2011 by country, compiled by the Lisbon-based International Nickel Study Group. Disponível em: http://www.businessweek.com/news/2012-05-28/worlds-10-biggest-nickel-consuming-countries-in-2011. Acesso em: 20 fevereiro 2014.

TZEFERIS, P.G.; AGATZINI·LEONARDOU, S. Leaching of nickel and iron from Greek non-sulphide nickeliferous ores by organic acids. Hydrometallurgy, n. 36, p. 345-360, 1994.

VAHID, F.; ENGLE R. F. Codependent cycles. Journal of Econometrics v. 80 n. 2, p. 199-221, 1997.

VAHID, F.; ENGLE R. F. Common trends and common cycles. Journal of Applied Econometrics v. 8, n. 4, p. 341-360, 1993.

VAHID, F.; ISSLER J. V. The importance of common cyclical features in var analysis: a monte-carlo study. Journal of Econometrics v. 109 n. 2, p. 341-363, 2002.

VALE S.A. Vale—Newfoundland and Labrador. Rio de Janeiro, 2010a. Disponível em: http://nickel.vale.com/countries/canada/voisey/. Acesso em: 21 setembro 2011.

VALE S.A. World stainless steel statistics. Toronto, 2010b. p. 3-7.

VALIX, M.; TANG, J.Y.; CHEUNG, W.H. The effects of mineralogy on the biological leaching of nickel laterite ores. Minerals Engineering, v. 14, n. 12, p.1629-1635, 2001.

WAGNER, L. Economic drivers of mineral supply. Reston: U.S. Dept. of the Interior, U.S. Geological Survey, 2003.

WENG, G.; BHALLA, U. S.; IYENGAR, R. Complexity in biological signaling systems. Science, v. 284, n. 5411, p. 92-96, Apr. 1999. DOI:10.1126/science.284.5411.92.

WHARTON, J. Nickel and cobalt. In: Eighteenth Annual Report of the United States Geological Survey, 1896–97. Washington: U.S. Geological Survey, 1897. pt. 5, p. 329–342.

WHITESIDES, G. M.; ISMAGILOV, R. F. Ismagilov, Complexity in Chemistry, Science v. 284, n. 5411, p. 89-92, 2 April 1999. DOI:10.1126/science.284.5411.89

WILBURN, D.R. Material use in the United States: selected case studies for cadmium, cobalt, lithium, and nickel in rechargeable batteries. U.S. Geological Survey Scientific. Investigations Report, 2008-5141. 19 p.

WILLIS, B. Developments and Trends in Hydrometallurgical Processing of Nickel Laterites, ALTA 2012. Perth, 2012.

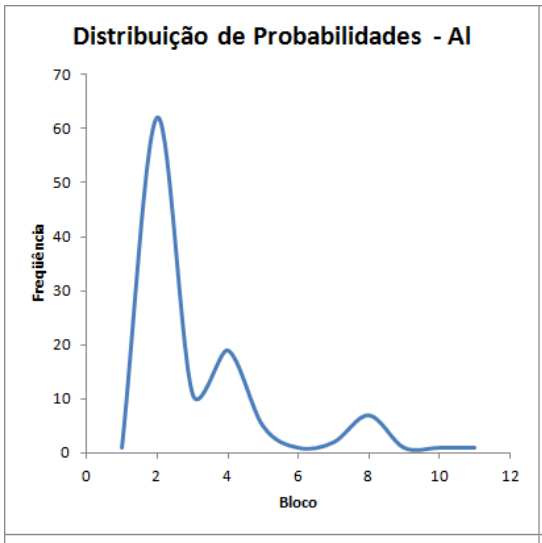
WOLFRAM, S. A new kind of science, Champaign: Wolfram Media, 2002.

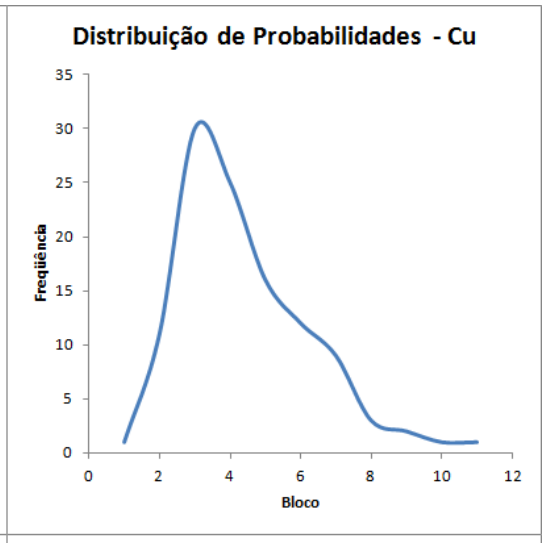
WOLFRAM, S. Cellular Automata As Models of Complexity, Physica 10D, p. 1-35, 1984.

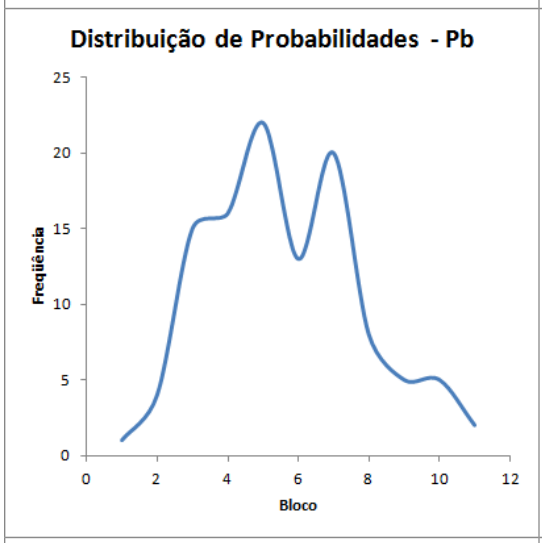
WORLD NICKEL STATISTICS (WNS) 1998. The Hague: International Nickel Study Group, v. 8, no. 11, p. 64-66, Nov. 1998.

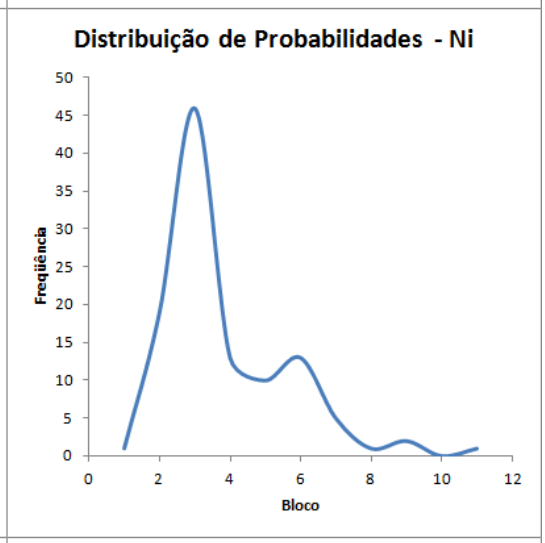
YOUPING, Z.; YUSHENG, Z.; ZHAOYI, L. Technical analysis of producing low Ni pig iron with laterite in a blast furnace. Baosteel Technical Research , p. 36-40, 2008.

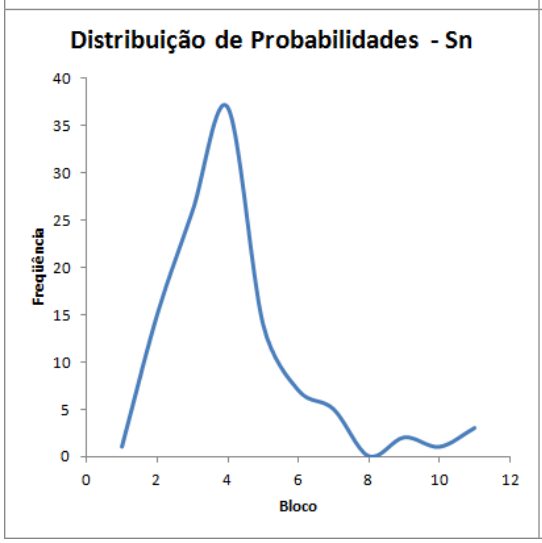
APÊNDICE 1 - DISTRIBUIÇÕES DE PROBABILIDADES - 6 METAIS

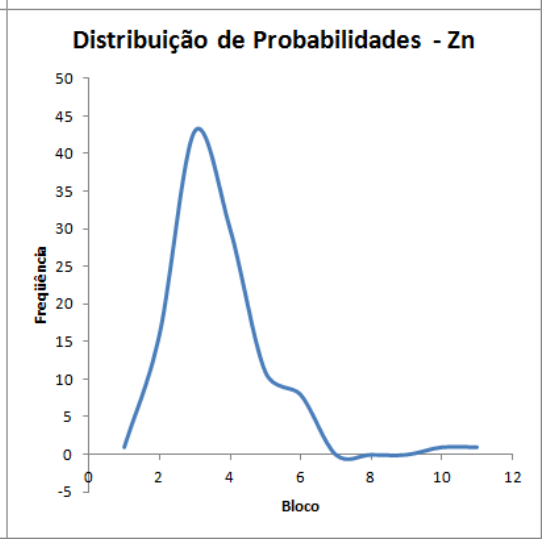












ANEXO 1 - PREÇOS E VOLUMES DE *COMMODITIES* MINERAIS, DE 1950 A 2010.[11]

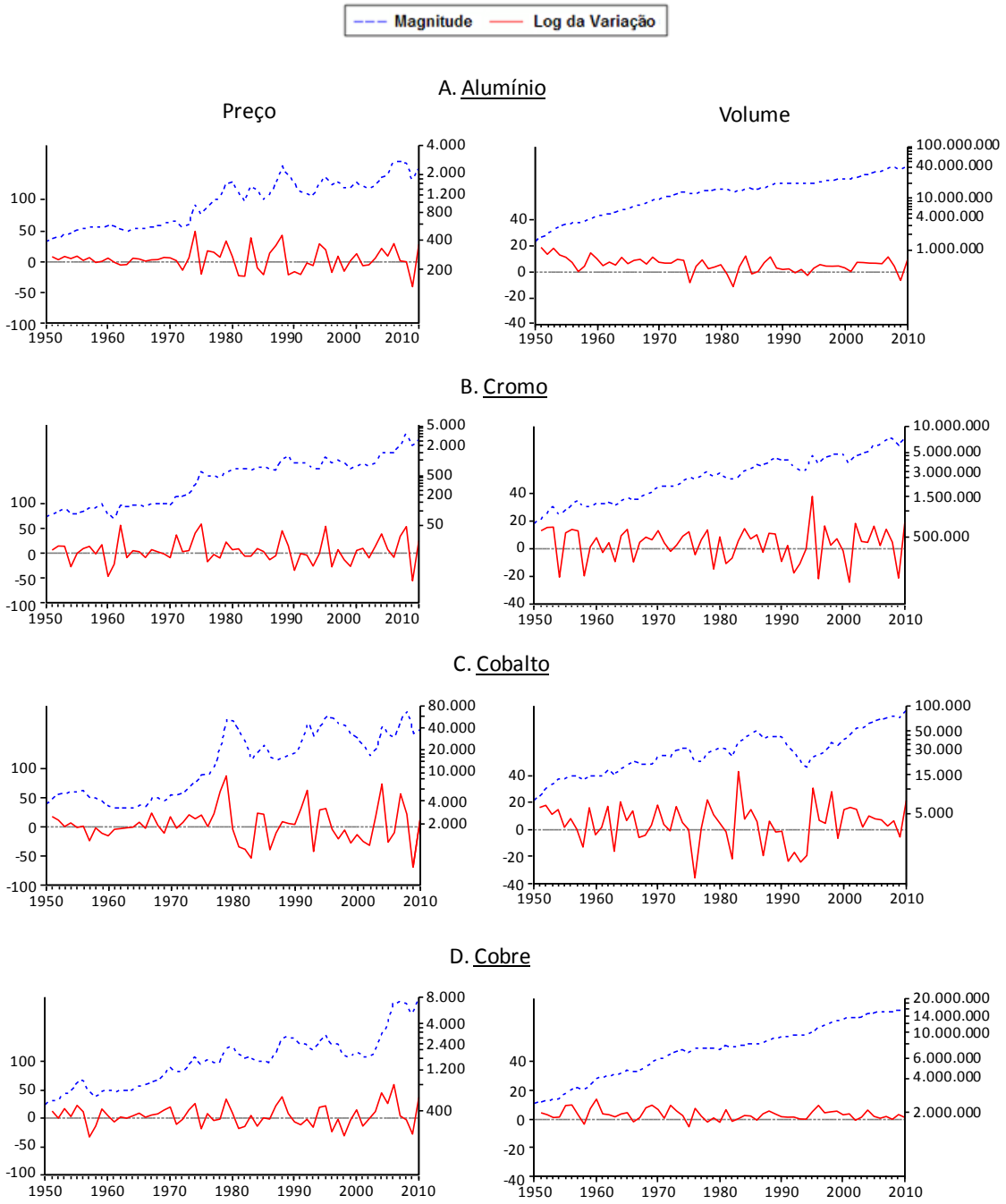


Figura 68 - Evoluções de preço e variação de volume (log) de Al, Cr, Co e Cu, de 1950 a 2010

[11]1. os preços são nominais em USD / tonelada e os volumes referem–se à produção mundial em toneladas.
2. o eixo da direita (escala logarítmica) refere–se à magnitude; o eixo da esquerda refere–se ao logaritmo das variações anuais x 100.

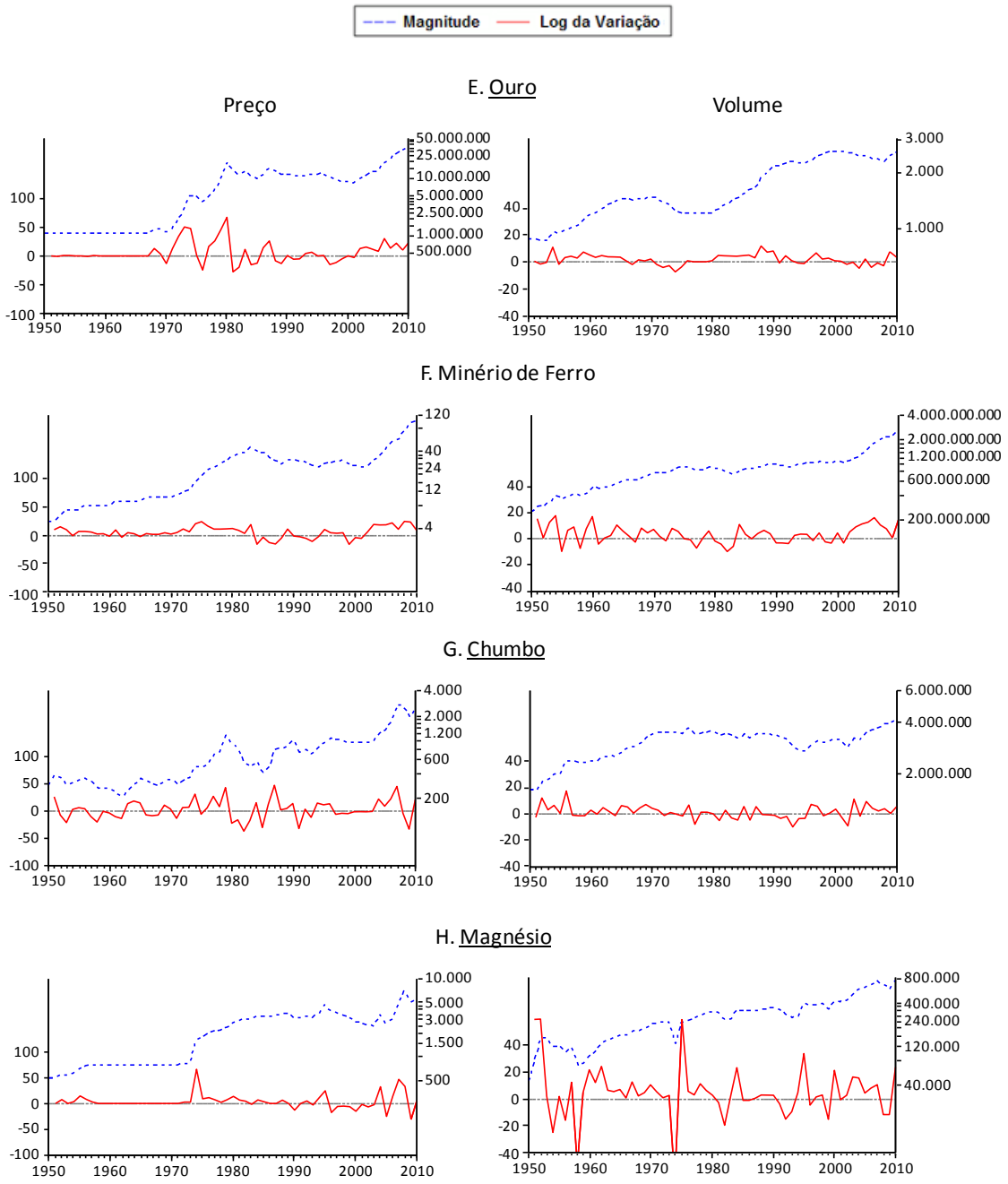


Figura 69 - Evoluções de preço e variação de volume (log) de Au, Fe (concentrado), Pb e Mg, de 1950 a 2010

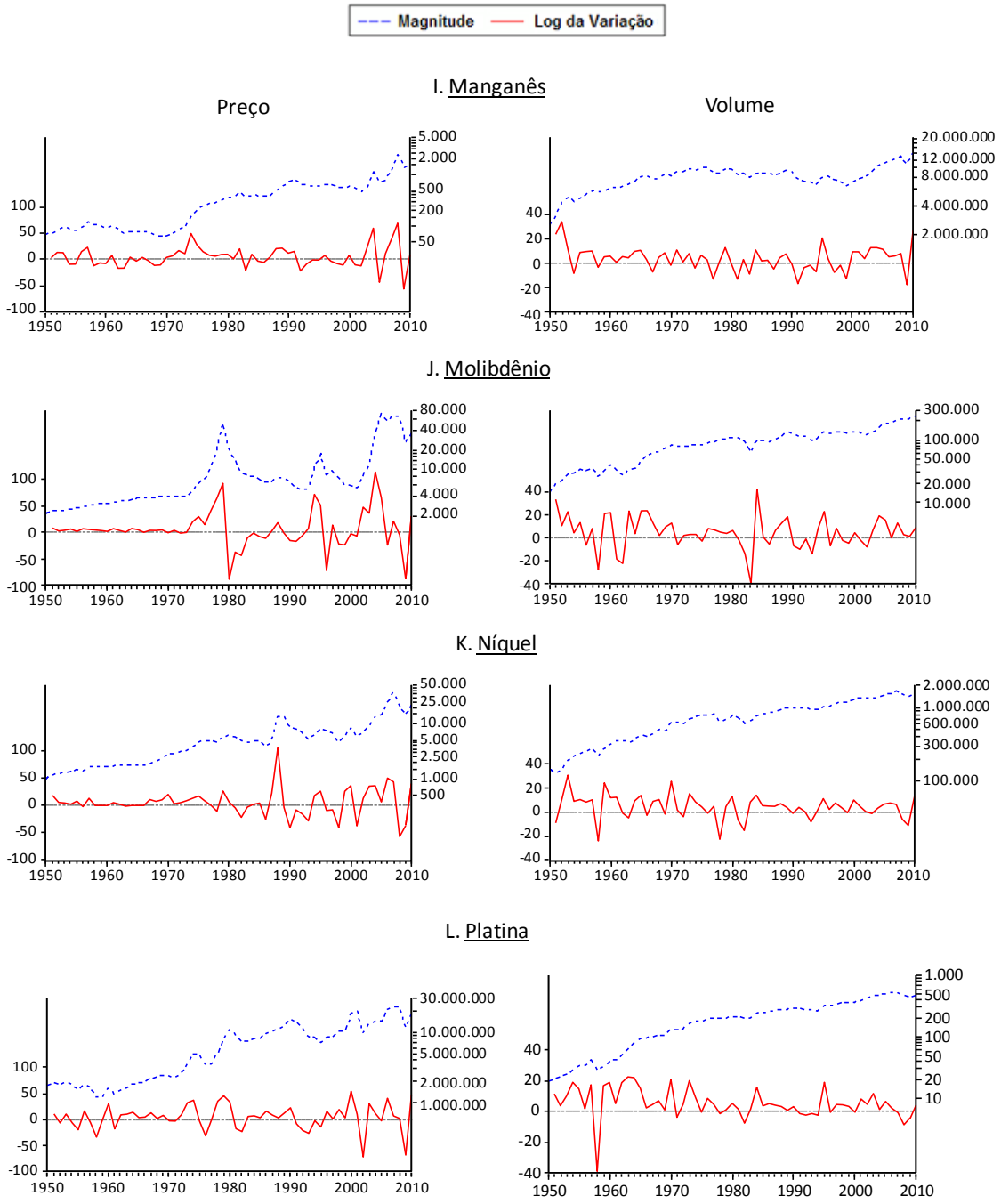


Figura 70 - Evoluções de preço e variação de volume (log) de Mn, Mo, Ni e Pt, de 1950 a 2010

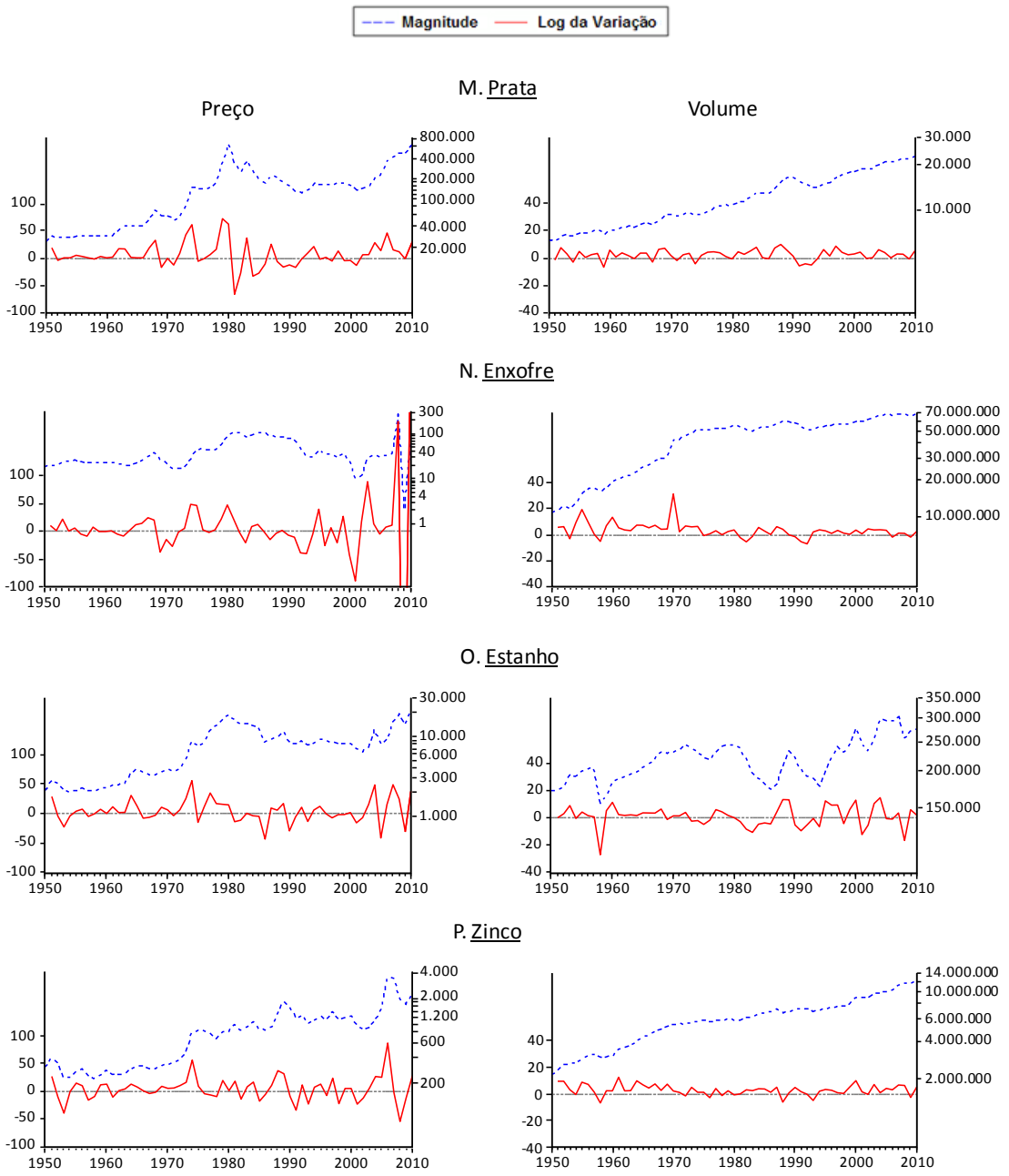


Figura 71 - Evoluções de preço e variação de volume (log) de Ag, S, Sn e Zn, de 1950 a 2010

ANEXO 2 - VARIAÇÃO DE PREÇOS DE 21 *COMMODITIES* X VARIAÇÃO DO PREÇO MÉDIO, DE 1900 A 2007.

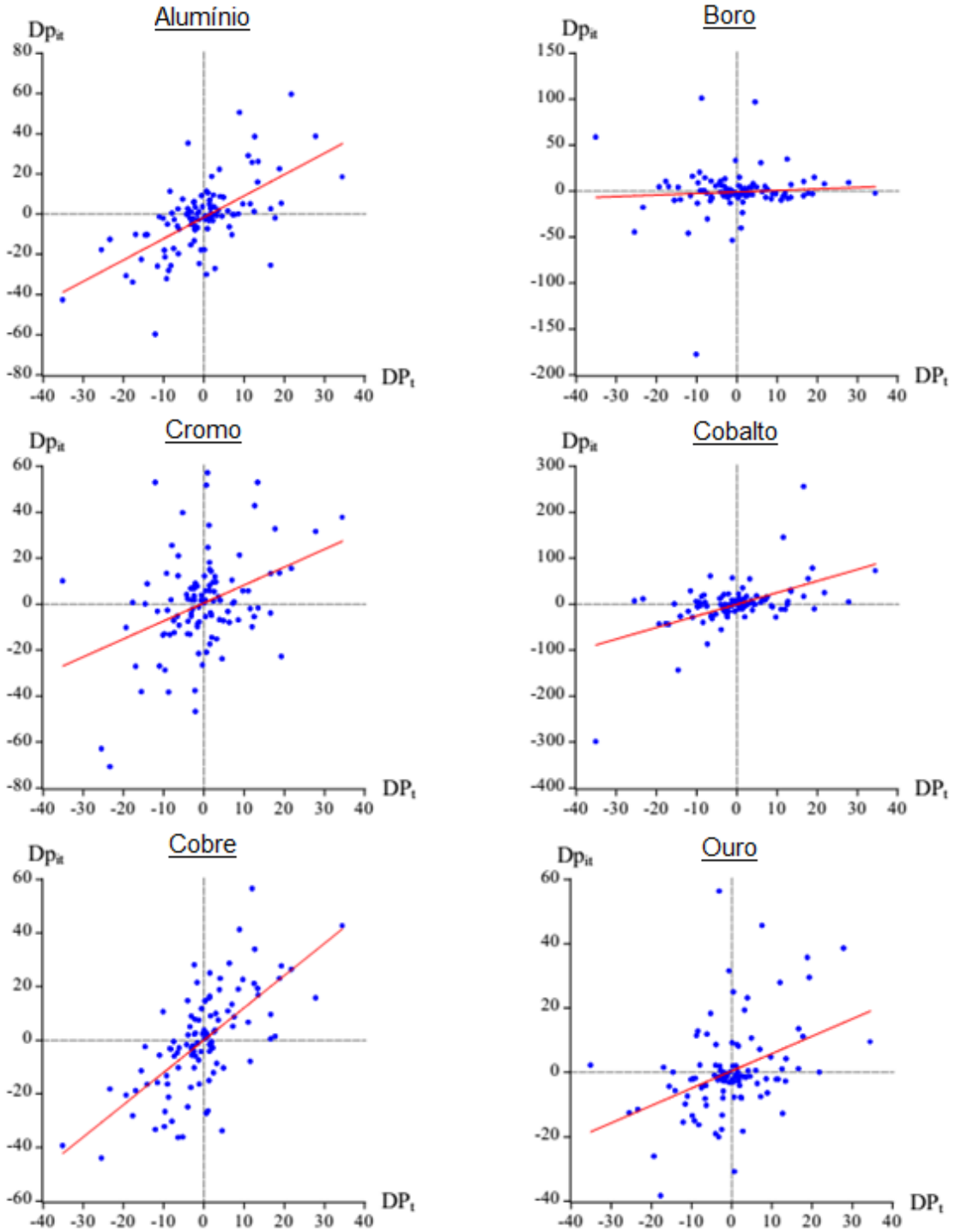


Figura 72 - Variações de preço (log) de Al, B, Cr, Co, Cu e Au *versus* das variações de preço (log) médio das 21 *commodities*, de 1900 a 2007

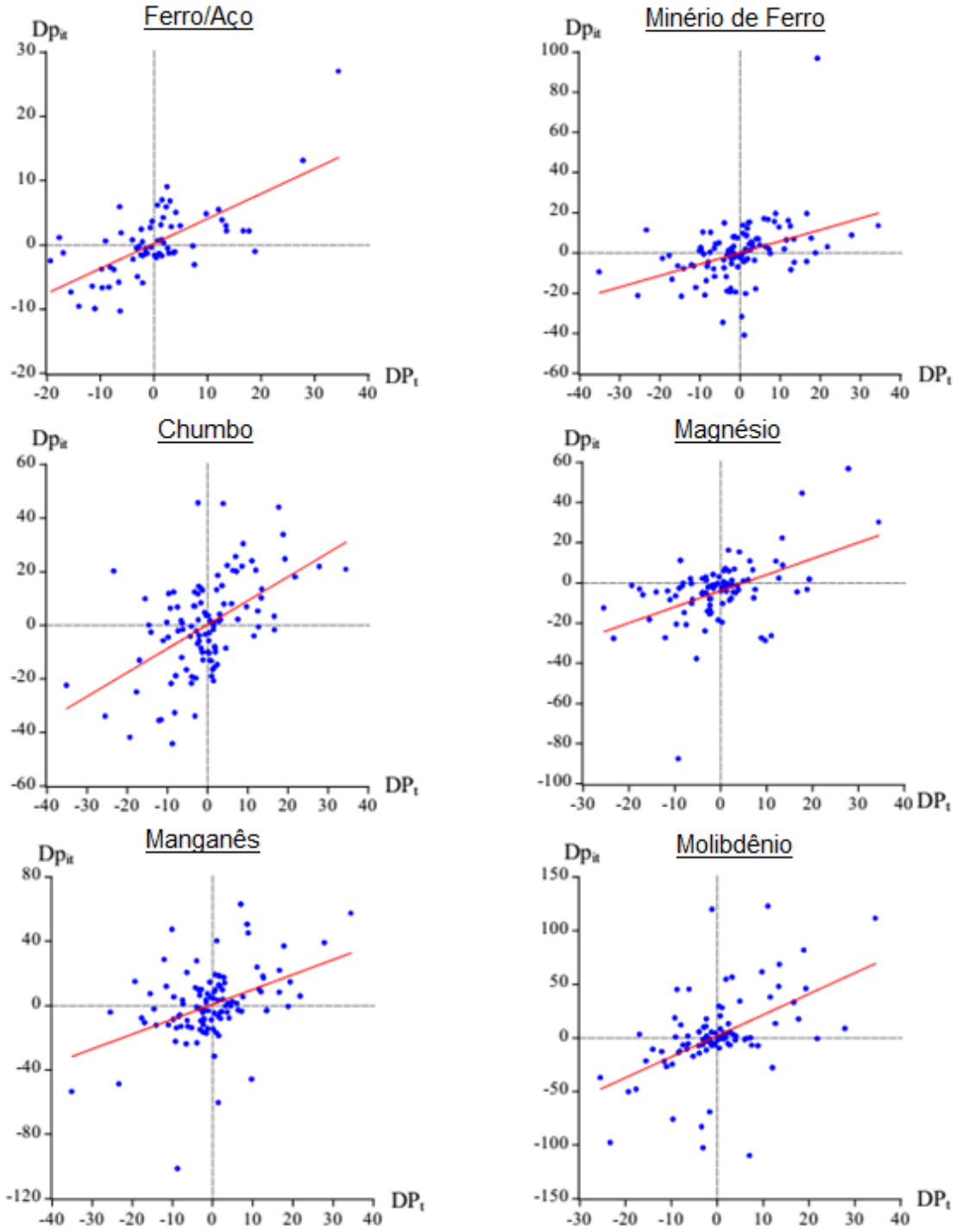


Figura 73 - Variações de preço (log) de Fe (aço), Fe (concentrado), Pb, Mg, Mn e Mo *versus* das variações de preço (log) médio das 21 *commodities*, de 1900 a 2007

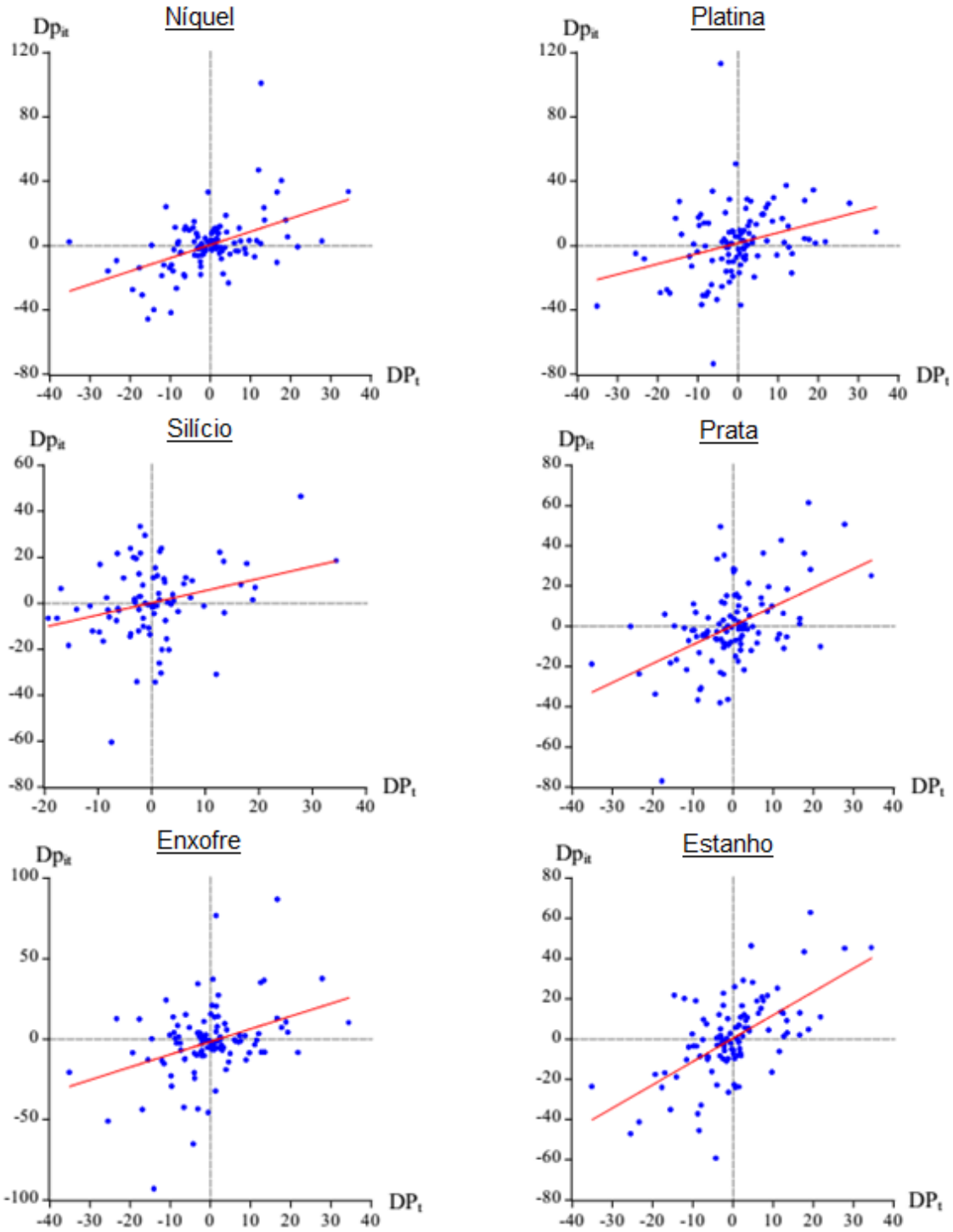


Figura 74 - Variações de preço (log) de Ni, Pt, Si, Ag, S e Sn *versus* das variações de preço (log) médio das 21 *commodities*, de 1900 a 2007

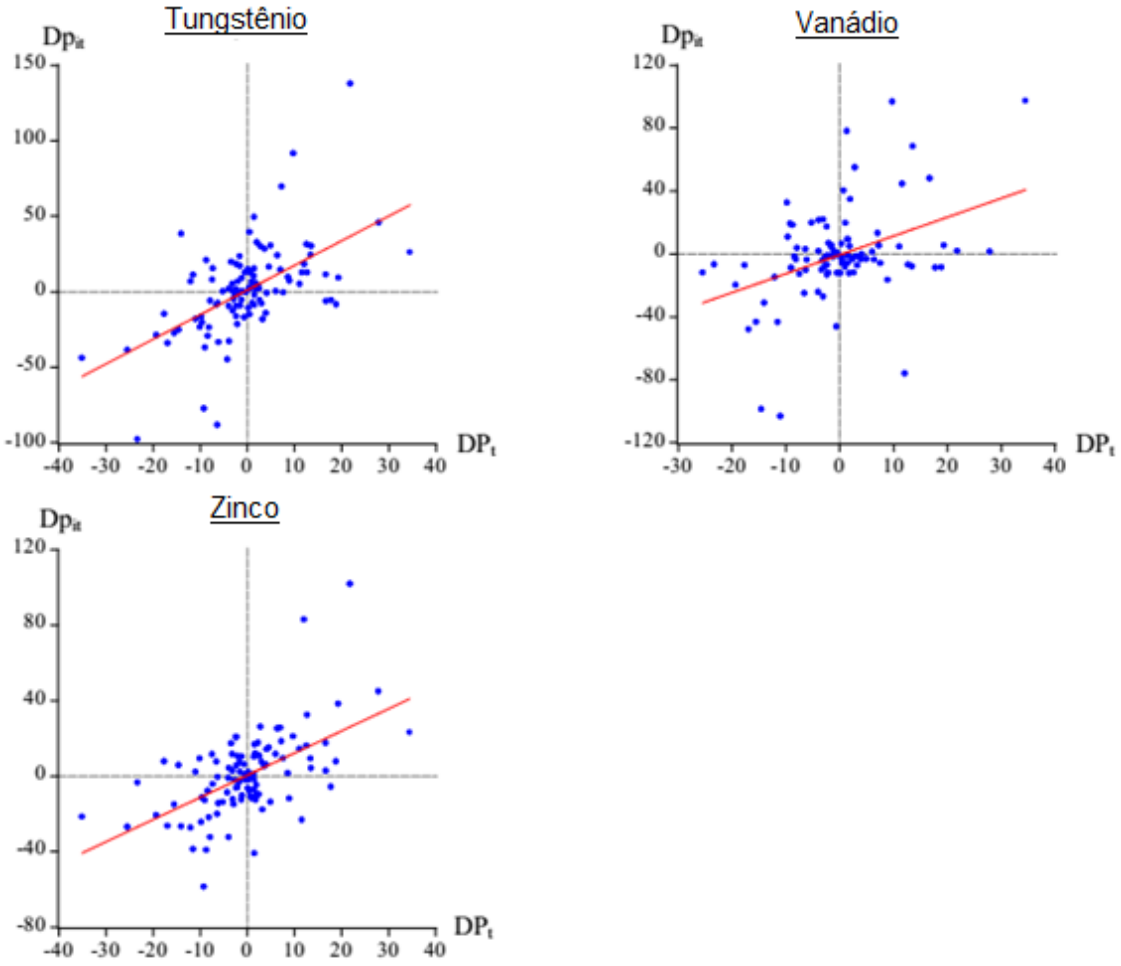


Figura 75 - Variações de preço (log) de W, V e Zn *versus* das variações de preço (log) médio das 21 *commodities*, de 1900 a 2007

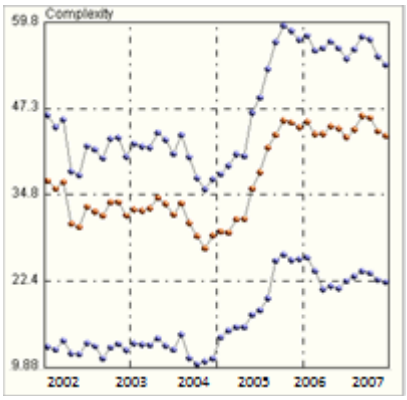
Tabela 9 - Risco global por commodity

Ranking* de Risco Global por *commodity			
Ranking	*Commodity*	Fator de Risco (%)	
		Global	Específico
1º	ferro/aço	46,59	53,41
2º	cobre	45,40	54,60
3º	alumínio	38,42	61,58
4º	estanho	36,95	63,05
5º	tungstênio	31,91	68,09
6º	zinco	31,62	68,38
7º	cobalto	28,27	71,73
8º	chumbo	27,48	72,52
9º	molibdênio	25,31	74,69
10º	prata	24,30	75,70
11º	magnésio	23,07	76,93
12º	**níquel**	**23,07**	**76,93**
13º	manganês	18,14	81,86
14º	minério de ferro	16,15	83,85
15º	vanádio	16,15	83,85
16º	ouro	15,96	84,04
17º	cromo	14,46	85,54
18º	enxofre	13,27	86,73
19º	platina	9,30	90,70
20º	silício	8,48	91,52
21º	boro	0,42	99,58
Média		23,56	76,44

ANEXO 3 - ANÁLISE DA CRISE IMOBILIÁRIA NORTE AMERICANA DE 2007

A “bolha” de preços que surgiu no mercado imobiliário norte americano de imóveis no período de 2005 a 2007 levou um número crescente de consumidores a hipotecar suas residências para utilizar os recursos resultantes em consumo em um círculo vicioso, já que neste período os preços dos imóveis aumentavam continuamente. Mesmo tomadores com baixo potencial (*sub-prime*) conseguiam crédito devido à alta lucratividade das operações para os agentes financeiros. Quando a tendência de alta dos imóveis iniciou sua reversão, instalou-se a crise. O processo teve início no Outono de 2006 e em menos de um ano tomou proporções globais. Vários fatores concorreram para a ocorrência da crise mas os principais foram o aumento das taxas de juros, pela farta demanda de crédito, o aumento do saldo das hipotecas para os tomadores com taxa variável e, finalmente, o decréscimo do valor das propriedades com o fim da “bolha”, levando muitos imóveis a serem tomados de seus antigos proprietários e a prejuízos sem precedentes ao sistema financeiro local e global .

Para esta análise, foram consideradas mais de 50 variáveis, entre PIB, taxas de juros, inflação, taxas de câmbio, índices de bolsas de valores, quantidade de casas em construção, vendas de imóveis e outras informações sobre o mercado imobiliário, informações sobre hipotecas, custo de construção e várias outras, no período de junho de 2002 a dezembro de 2007, ou seja, 68 meses ou 5,5 anos. Nas Figura 76 a e b exibem-se respectivamente as evoluções da complexidade e da robustez do sistema (com a entropia em inserto) composto pelo mercado imobiliário norte-americano no período citado.



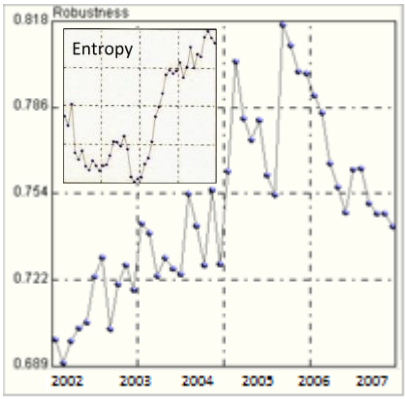


Figura 76 - Evolução da complexidade (a-esquerda) e da robustez/entropia (b-direita) do mercado imobiliário norte-americano entre 2002 e 2007

O objetivo do estudo foi o de tentar identificar flutuações de complexidade e entropia no mercado que indicassem a presença de traumas iminentes. Observa-se na Figura 76a que a complexidade (linha intermediária) oscilou em torno de 35 e, após uma pequena queda em 2004 cresceu aproximadamente 40% no ano de 2005 após o que se estabilizou em 2006 neste patamar. Observa-se na Figura 76b que simultaneamente a entropia cresce de forma contínua de 2003 até 2007 e que a robustez acompanha este crescimento até que, nos últimos meses de 2006, entra em queda e não mais se recupera dentro do período analisado. A queda da robustez do sistema se deve ao aumento de sua complexidade operacional concomitantemente à redução da complexidade crítica a partir do final de 2005, indicadas pelas linhas intermediária e superior, respectivamente, na Figura 76a. O sistema passa a funcionar então na região de alta complexidade, na qual acréscimos de entropia podem causar mudanças de estado, entre elas, um colapso total com perda de funcionalidade. O colapso se seguiu em agosto de 2007. Portanto, 18 meses antes do colapso já era possível notar os primeiros sinais de instabilização do sistema.

ANEXO 4 - AVALIAÇÃO DE ESTABILIDADE DE PACIENTES EM UTI

O objetivo do estudo conduzido pelo autor e por uma equipe de apoio do Hospital Universitário da Universidade de São Paulo[12], com autorização do coordenador de pesquisa do hospital[13], foi o de avaliar preliminarmente a aplicação dos indicadores de complexidade na quantificação da estabilidade de pacientes sujeitos a intubação.

Pacientes intubados devem ser extubados assim que estejam estáveis o suficiente, de modo a evitar infecções decorrentes de intubação prolongada, mas não antes, sob risco de que a perturbação provocada pela extubação provoque um colapso irreversível no paciente. A importância do estudo é que ainda não existe um indicador seguro de estabilidade, o que obriga os médicos a executar um procedimento denominado *stress-test* pelo qual o paciente é extubado em condições controladas e sua reação é acompanhada, tomando-se então a decisão sobre a remoção ou não do tubo. Ocorre que mesmo a perturbação causada pelo *stress-test* pode ser suficiente para causar uma crise em um paciente muito instável, o que segundo os médicos da equipe de apoio não é um evento raro, inclusive resultando em óbito.

A informação disponível à equipe médica, coletada por sensores instalados no paciente, é disponibilizada por monitores e armazenada no sistema de controle. Foram analisados os dados armazenados de dois pacientes, PAC 12 CFS e PAC 2 EPS, que foram extubados e tiveram resultados diferentes. Na Figura 77 exibe-se a informação disponível à equipe médica por meio dos monitores do sistema. Os dados se referem a um período de cerca de 30 minutos correspondente ao *stress-test* subsequente à extubação. Os dados exibidos de interesse são:

- FC: frequência cardíaca
- PAis: pressão sanguínea invasiva sistólica
- PAid: pressão sanguínea invasiva diastólica
- PAim: pressão sanguínea invasiva média
- SpO2: saturação de oxigênio

---

[12] Dr. Lucas Oliveira e Dr. Francisco Soriano
[13] Dr. Paulo Lotufo

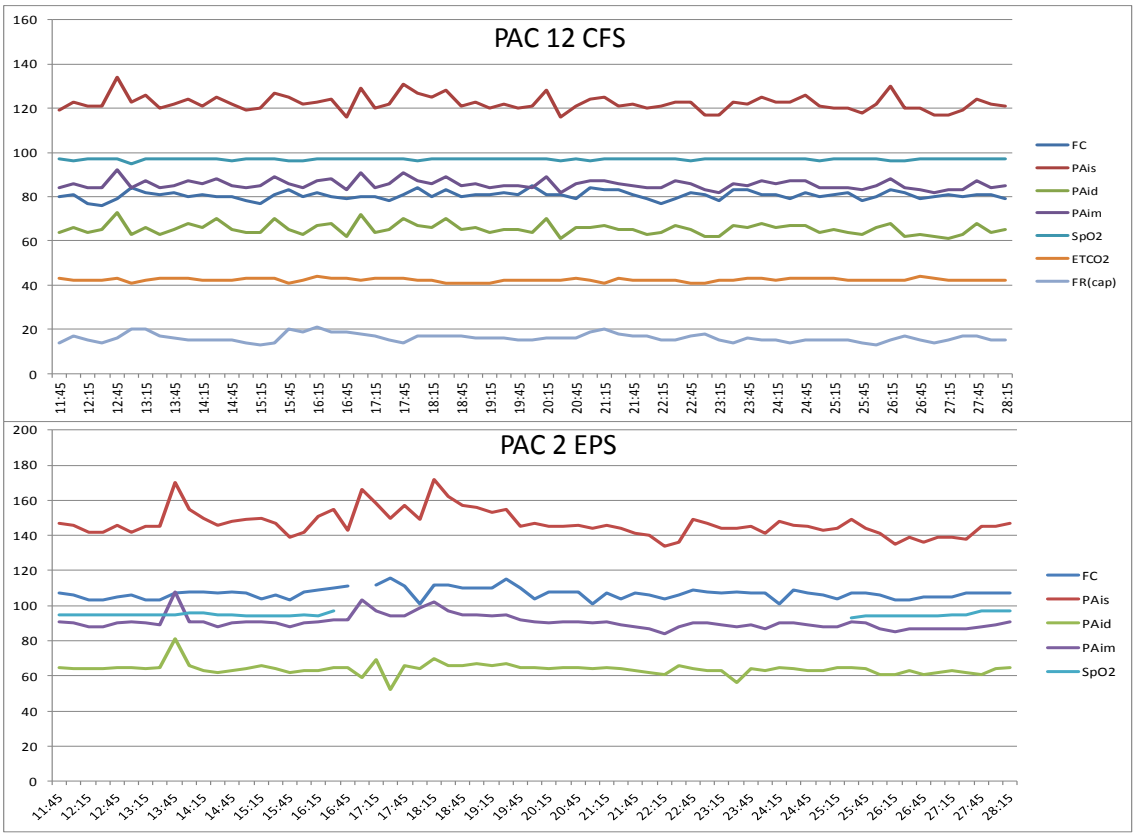


Figura 77 - Dados vitais dos pacientes exibidos nos monitores da UTI para o período de *stress-test* dos dois pacientes

Apesar de ser possível notar algumas diferenças nos gráficos dos dois pacientes, a equipe médica concorda que não é possível avaliar a estabilidade dos pacientes contando unicamente com tal informação.

A Figura 78 exibe os indicadores de complexidade (complexidade, entropia e robustez) extraídos dos dados exibidos na Figura 77 (as variáveis ETCO2 e FR(cap) do paciente PAC 12 CFS não foram utilizadas) nos quais se pode perceber que:

- o paciente PAC 2 EPS inicia o *stress-test* em uma região de alta instabilidade até o passo 27, passa por uma região de relativa estabilidade até o passo 55, porém com um alto valor de entropia, valor este que aos a volta ao padrão de instabilidade torna a aumentar. O nível de complexidade é crescente para todo o período observado.
- o paciente PAC 12 CFS apresenta a mesma instabilidade inicial após a perturbação causada pelo *stress-test* mas, em contraste, recupera a estabilidade muito mais rapidamente no passo 17, atingindo um nível baixo de

entropia que é mantido até ao fim do teste. O nível de complexidade se mantém estável.

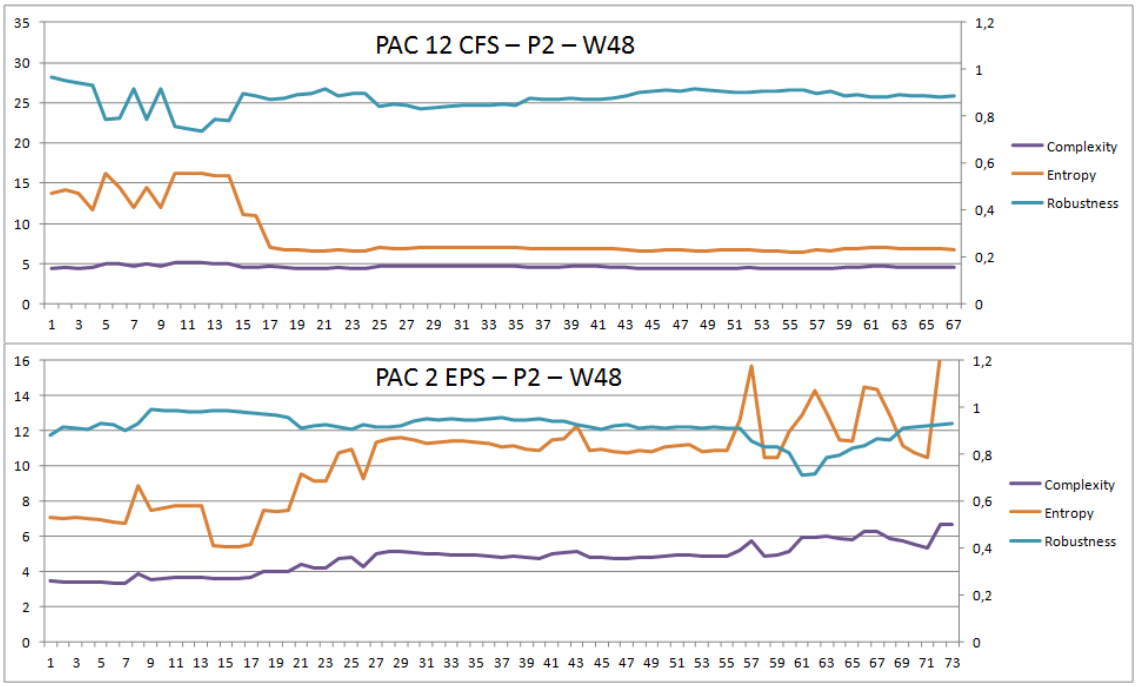


Figura 78 - Indicadores de complexidade para o mesmo período de *stress-test* dos dois pacientes

Nos dois casos, o que se vê são os mecanismos de regulação de sistemas fisiológicos agindo no sentido de restaurar seu equilíbrio após uma perturbação externa - a extubação. De fato, os resultados são claramente visíveis pelos indicadores de complexidade, com o paciente PAC 12 CFS conseguindo voltar à estabilidade autonomamente, passando portanto com sucesso no teste, contrariamente ao paciente PAC 2 EPS.

Na etapa seguinte do estudo, procurou-se identificar indicações prévias da condição de estabilidade do paciente de forma a evitar o procedimento de *stress-test* e suas consequências imprevisíveis para o paciente. O resultado é exibido na Figura 79, na qual se pode observar que, mesmo anteriormente ao *stress-test*, a condição de estabilidade dos dois pacientes é claramente desigual. O paciente PAC 2 EPS já se apresentava obviamente instável anteriormente ao teste, ao passo que o paciente PAC 12 CFS apresentou apenas uma ligeira instabilidade imediatamente antes do teste, devido, segundo à equipe médica, ao stress emocional passado pelo paciente ao perceber a aproximação da equipe para a realização do teste.

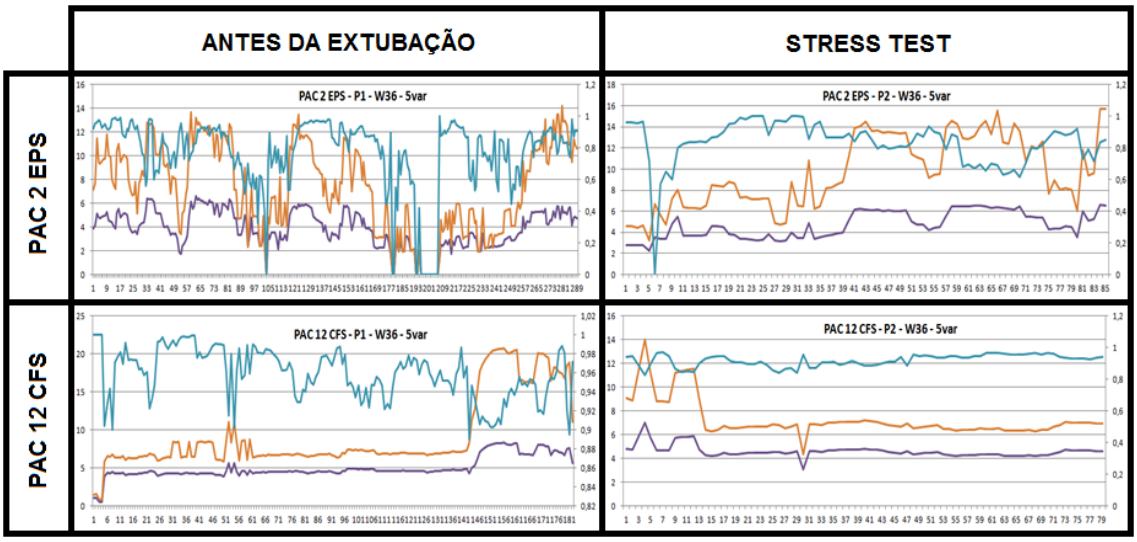


Figura 79 - Comparativo dos indicadores de complexidade entre os períodos pré e pós *stress-test* dos dois pacientes

Há ainda outras pesquisas em andamento em vários centros médicos, utilizando os indicadores de complexidade como avisos prévios de degradação do funcionamento de sistemas fisiológicos, podendo-se citar como exemplo as pesquisas conduzidas pelo Dr. Andriy Batchinsky e colaboradores[14] no Instituto de Pesquisa Cirúrgica do Exército dos Estados Unidos (U.S. Army Institute of Surgical Research).

[14] 1. Batchinsky AI, Cooke WH, Kuusela T, et al. Loss of complexity characterizes the heart–rate response to experimental hemorrhagic shock in swine. Crit Care Med 2007;35:519–525.
2. Batchinsky AI, Salinas J, Kuusela T, et al. Rapid Prediction of Trauma–Patient Survival by Analysis of Heart–Rate Complexity: Impact of Reducing Dataset Size. Shock 2009;32 565–571.
3. Batchinsky AI, Cancio LC, Salinas J, et al. Prehospital loss of R–to–R interval complexity is associated with mortality in trauma patients J Trauma 2007;63:512–518.
4. Cancio LC, Batchinsky AI, Salinas J, et al. Heart–rate complexity for prediction of prehospital lifesaving interventions in trauma patients. J Trauma 2008;65:813–819.