

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E
AMBIENTAL

**Um modelo para integrar o processo logístico-produtivo de
colheita de cana-de-açúcar à capacidade de produção da usina**

PAULO ROBERTO VIEIRA DE ALMEIDA

ORIENTADOR: REINALDO C. GARCIA
CO-ORIENTADORA: ADELAIDA P. FONSECA

TESE DE DOUTORADO EM TRANSPORTES

PUBLICAÇÃO: T.TD-004/2022

BRASÍLIA / DF: DEZ / 2022

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

**UM MODELO PARA INTEGRAR O PROCESSO LOGÍSTICO-
PRODUTIVO DE COLHEITA DE CANA-DE-AÇÚCAR À
CAPACIDADE DE PRODUÇÃO DA USINA**

PAULO ROBERTO VIEIRA DE ALMEIDA

**TESE DE DOUTORADO SUBMETIDA AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
EM TRANSPORTES DO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E
AMBIENTAL DA FACULDADE DE TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE DE
BRASÍLIA COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A
OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR EM TRANSPORTES.**

APROVADA POR:

**Prof. Dr. Reinaldo C. Garcia – PPGT/UnB
(ORIENTADOR)**

**Prof. Dr. Sérgio R. Granemann – PPGT/UnB
(EXAMINADOR INTERNO)**

**Prof. Dr. Reginaldo Santana Figueiredo – UFG
(EXAMINADOR EXTERNO)**

**Prof. Dr. José Vicente Caixeta Filho – ESALQ
(EXAMINADOR EXTERNO)**

BRASÍLIA/DF, 07 de dezembro de 2022.

FICHA CATALOGRÁFICA

ALMEIDA, PAULO ROBERTO VIEIRA

Modelo para integrar o processo logístico-produtivo de colheita de cana-de-açúcar à capacidade de produção da usina / tese. Brasília, 2022.

XII, 101 p., 210x297mm (ENC/FT/UnB, Doutor, Transportes, 2022).

Tese de Doutorado – Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.
Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.

1. Logística

2. Setor sucroenergético

3. Sincronização

4. Simulação

I. ENC/FT/UnB

II. Título (série)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

ALMEIDA, P. R. V (2022). Modelo para integrar o processo logístico-produtivo de colheita de cana-de-açúcar à capacidade de produção da usina T.TD-004/2022. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 109 p.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Paulo Roberto Vieira de Almeida

TÍTULO DA TESE: Modelo para integrar o processo logístico-produtivo de colheita de cana-de-açúcar à capacidade de produção da usina.

GRAU: Doutor

ANO: 2022

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta tese de doutorado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte dessa tese de doutorado pode ser reproduzida sem autorização por escrito do autor.

Paulo Roberto Vieira de Almeida

DEDICATÓRIA

Aos meus pais, Paulo e Nilva,

Aos meus irmãos Rafael e Daniel.

AGRADECIMENTOS

A professora Adelaida Pallavicini Fonseca, pela orientação, amizade, pelo seu incentivo ao desenvolvimento do conhecimento científico e, e acima de tudo pelo exemplo de pessoa e conduta de vida, sem os quais, esse trabalho final não seria possível.

Ao professor Reinaldo C. Garcia pela coragem, orientação, exemplo de profissionalismo e todo suporte prestado durante essa trajetória.

A todos os professores do Programa de Pós-Graduação em Transportes pelos ensinamentos.

A meus amigos Ielik Miguel e Luan Ferreira pelo companheirismo e apoio.

A todos vocês meus sinceros agradecimentos.

RESUMO

MODELO PARA INTEGRAR O PROCESSO LOGÍSTICO-PRODUTIVO DE COLHEITA DE CANA-DE-AÇÚCAR À CAPACIDADE DE PRODUÇÃO DA USINA

O setor sucroenergético é extremamente importante para economia brasileira, dele derivam diversas outras cadeias produtivas, gerando alguns dos principais produtos ligados a alimentação e fonte energética (açúcar e etanol). O processo de colheita da cana-de-açúcar ocorre em frentes de cortes de perfis de capacidade produtiva diferentes, disponibilidade de maquinários limitados, e com a coordenação das operações ligadas à programação de produção da usina. A tomada de decisão da usina sobre o que produzir (açúcar ou etanol) associa-se diretamente aos preços pagos por esses dois produtos no mercado. Nesta pesquisa, foi desenvolvido um modelo de integração dos processos logísticos e produtivos da colheita de cana-de-açúcar com a demanda da usina, com enfoque na sincronização e otimização das operações. Para tanto, fez-se a análise da transmissão de volatilidade de preços para entender como as mudanças nos preços impactam cada elo da cadeia produtiva. Em seguida o modelo de processos logísticos e produtivos foi construído baseado nas características da usina escolhida para estudo de caso, que está localizada em São Paulo, possuindo uma planta fabril de grande porte, e colheita 100% mecanizada. O software *Stella* foi escolhido como plataforma para se desenvolver o modelo de simulação, e como possui código aberto foi possibilitado a construção de um aplicativo para auxiliar nas decisões gerenciais da usina. O desenvolvimento do presente trabalho demonstrou que é possível sincronizar os processos logísticos e produtivos com a demanda de mercado da usina, e que a performance das atividades nas frentes de corte pode ser otimizada no uso da colhedora, velocidades de deslocamento e equipe.

ABSTRACT

MODEL TO INTEGRATE THE SUGARCANE HARVEST LOGISTICS- PRODUCTIVE PROCESS INTO THE PLANT'S PRODUCTION CAPACITY

The sugar-energy sector is extremely important for the Brazilian economy, in several other production chains, generating some of the main products related to food and energy sources (sugar and ethanol). The sugarcane harvesting process takes place in front of the productive production capacity, limiting machinery profiles, and with the coordination of availability operations combined with the production schedule. The mill's decision-making on what to produce (sugar or ethanol) is directly associated with the prices paid for these two products on the market. In this research, a model was developed to integrate the logistic and production processes of the sugarcane harvest with demand from the plant, with sugar in the synchronization and optimization of operations. Therefore, price volatility was transmitted to understand how prices impact each link in the production chain. Then, the logistical and production process model was built based on the characteristics of the plant chosen for the large size of the case, which is located in São Paulo, has a manufacturing plant, and 100% mechanized harvesting. The Stella software was chosen as the platform to develop the simulation model, and as open source it was made possible to build an application to assist in plant management decisions. The development of optimized work in operations may be possible, synchronizing logistical and production processes with the demand of processes of activities on the team's work fronts, and that can be synchronized with the demand of activities in the use of the harvester, displacement speeds.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
1.1 PANORAMA DO SETOR SUCROENERGÉTICO.....	2
1.2 PROBLEMA DE PESQUISA.....	5
1.3 OBJETIVOS.....	6
1.3.1. Objetivo geral	6
1.3.2. Objetivos específicos	6
1.4 JUSTIFICATIVA	6
1.5 DELIMITAÇÃO DO ESTUDO	9
1.6 METODOLOGIA DA PESQUISA	9
1.7 METODOLOGIA DE SINCRONIZAÇÃO	11
2. REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA	13
2.1 SISTEMAS LOGÍSTICOS.....	15
2.2 SINCRONIZAÇÃO LOGÍSTICA	17
2.3 MODELOS DE SIMULAÇÃO NO SETOR SUCROENERGÉTICO	20
2.3.1. <i>System dynamics</i>	22
2.3.2. Conceitos e modelos de transmissão de volatilidades	25
3. SETOR SUCROENERGÉTICO BRASILEIRO	38
3.1 CARACTERIZAÇÃO DA CADEIA PRODUTIVA SUCROENERGÉTICA.....	39
3.2 PERFIL DA PRODUÇÃO DE CANA-DE-AÇÚCAR E ETANOL NO BRASIL	41
3.3 EQUIPAMENTOS DE COLHEITA EM ÁREAS PRODUTIVAS DE CANA-DE-AÇÚCAR.....	45
4. MODELO DE TRANSMISSÃO DE VOLATILIDADE AO LONGO DA CADEIA SUCROENERGÉTICA	47
4.1 ESCOLHA DO MODELO	47
4.2 DADOS E PROCEDIMENTOS.....	47
5. MODELO DE PROCESSOS LOGÍSTICOS PRODUTIVOS	59
5.1 ESCOLHA DA FAZENDA-INDÚSTRIA PARA ESTUDO DE CASO.....	59
5.2 MAPEAMENTO DO SISTEMA LOGÍSTICO CCT (CORTE, CARREGAMENTO E TRANSPORTE)	61
5.3 COLETA DE DADOS.....	65
5.4 APRESENTAÇÃO E CONSTRUÇÃO DO MODELO.....	67
5.5 IDENTIFICAÇÃO DAS VARIÁVEIS E DIMENSIONAMENTO	69
5.6 RESULTADOS DA PESQUISA DE CAMPO.....	71

5.6.1. <i>Análise dos tempos nas frentes de corte</i>	71
5.6.2. <i>Análise dos tempos na usina</i>	73
5.7. VALIDAÇÃO E EXPERIMENTAÇÃO DO MODELO	75
5.8. SIMULAÇÕES	75
6. CONCLUSÕES	81
6.1. LIMITAÇÕES E RECOMENDAÇÕES PARA ESTUDOS FUTUROS	83
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	85
ANEXO A – PAINEL DE CONTROLE DO MODELO	94
ANEXO B – APLICATIVO E ESTRUTURA DE TELAS	95
ANEXO C - APLICATIVO - PAINEL DE GERENCIAMENTO LOCALIZAÇÃO E TEMPO DE VEÍCULO	97
ANEXO D - EQUAÇÕES DO MODELO (REPLICABILIDADE DO MODELO)	98

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 - Área colhida de cana de açúcar em 1.000 ha	43
Tabela 3.1 - Cana esmagada na região Centro-Sul em 1.000 toneladas/mês	44
Tabela 3.1 - Rendimentos da cana-de-açúcar esmagada no Centro-Sul (ATR/ton).....	45
Tabela 4.1 - Estatísticas descritivas das séries de preços	49
Tabela 4.2 - Teste de raiz unitária das séries de preços.....	50
Tabela 4.3 - Estatísticas dos resíduos padronizados, resíduos padronizados ao quadrado considerando um modelo ARMA e teste ARCH-LM	50
Tabela 4.4 - Testes de raiz unitária das séries de retorno	54
Tabela 4.5 - Modelos BEKK bivariados considerando os preços do etanol e gasolina	56
Tabela 5.1 - Indicadores de eficiência dos equipamentos	66
Tabela 5.2 - Descrição dos tempos de deslocamentos na colheita	69
Tabela 5.3 - Descrição dos tempos de deslocamentos na usina	70
Tabela 5.4 - Descrição das velocidades dos equipamentos	70
Tabela 5.5 - Indicadores de eficiência	70
Tabela 5.6 - Tempos gastos por observação por evento/atividade (em minutos).....	71
Tabela 5.7 - Tempos Gastos por Observação por Evento/Atividade (em minutos)	73
Tabela 5.8 - Velocidade do C-SR por Observação por Evento/Atividade (em km/hora) ...	74
Tabela 5.9 - Velocidade Média dos TB por Amostras (em km/hora.....	74
Tabela 5.10 - Velocidade Média das Colhedoras por Amostras (em km/hora)	75
Tabela 5.11 - Simulações.....	78
Tabela 5.12 - Variações de preços e quantidade do etanol na usina em 2021.....	78

LISTA DE QUADROS

Quadro 2.1 - Sistematização de pesquisas	14
Quadro 2.2 - Visões da sincronização	15
Quadro 2.3 - Conceitos relacionados com a sincronização	18
Quadro 2.4 - Principais características das modelagens HARD e SOFT	25

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Evolução de preços mensais de etanol e açúcar de 2012 a 2019.....	04
Figura 1.2 - Metodologia da tese.....	10
Figura 1.3 - Framework da metodologia proposta.....	11
Figura 2.1 - Fluxograma de identificação e seleção de artigos para revisão sistemática	14
Figura 2.2 - Principais características das modelagens HARD e SOFT.....	15
Figura 3.1 - Cadeia produtiva da indústria sucroenergética.....	40
Figura 3.2 - Mapa da produção de cana-de-açúcar no Brasil.....	42
Figura 3.3 - Área plantada e produção de cana-de-açúcar 2005/06 a 2017/18.....	42
Figura 3.4 - Participação por regiões na produção de cana-de-açúcar.....	43
Figura 3.6 - Trator transbordo.....	46
Figura 3.5 - Colhedora.....	46
Figura 3.7 Transbordo.....	46
Figura 3.8 - Trator e transbordo.....	46
Figura 3.10 - Cavalos mecânicos + semi-reboque.....	46
Figura 3.9 - Semi-reboque.....	46
Figura 4.1 - Comportamento das séries de preços semanais do etanol na usina, distribuidor, revenda, e gasolina na revenda.....	47
Figura 4.2 - Retornos das séries de preços de etanol na usina.....	51
Figura 4.3 - Retornos das séries de preços de etanol no distribuidor.....	52
Figura 4.4 - Retornos das séries de preços de revenda.....	52
Figura 4.5 - Retornos das séries de preços da gasolina na revenda.....	53
Figura 5.1 - Fluxo de construção do modelo de sincronização.....	59
Figura 5.2 - Foto aérea usina sucroenergética.....	60
Figura 5.3 - Sistema Logístico CCT.....	64
Figura 5.4 - Modelagem da capacidade da colheitadeira.....	667
Figura 5.5 - Modelagem da operação do trator de transbordo e conjunto semirreboque	68
Figura 5.6 - Modelagem da operação na planta industrial.....	68
Figura 5.7 - Tempos Médios por Observação por Evento (em minutos).....	72
Figura 5.8 - Tempos por Observação por Evento/Atividade (em minutos).....	73
Figura 5.9 - Velocidade do C-SR por Observação por Evento/Atividade (em km/hora)....	74
Figura 5.10 - Simulações.....	77
Figura 5.11 – Perspectiva da sincronização.....	79

1. INTRODUÇÃO

Os estudos de sincronização de processos logísticos-produtivos com a demanda de mercado pelos produtos agrícolas brasileiros potencializam a otimização de recursos nas ações de planejamento, gerenciamento e operação das diversas cadeias logísticas do agronegócio no país. Com os resultados obtidos desses estudos, é possível traçar um plano logístico estratégico que oriente a definição de políticas, intervenções e ações no setor agrícola e no setor de transporte, fortalecendo dessa forma suas vantagens competitivas.

Ao longo de décadas, diante do mercado internacional, o Brasil tem-se projetado como um grande celeiro, pela produção em escala de diversos produtos agrícolas, cumprindo com as expectativas de qualidade de um mercado consumidor mais exigente. No entanto, as incertezas do ambiente; as oscilações de preços no mercado, principalmente das commodities; a burocracia, entraves e altos custos logísticos; assim como, outros fatores de ordem cultural, econômica e política, afetam o agronegócio brasileiro.

Apesar do esforço que o setor agrícola tem feito nas últimas décadas para se fortalecer como um setor produtivo forte, adotando novas tecnologias de trabalho, adquirindo equipamentos e maquinarias de pontas e integrando-se a cadeias consolidadas, principalmente de fortes grupos empresariais, dentre outras ações, não consegue obter os ganhos competitivos esperados pela falta de:

- políticas claras e específicas para as diferentes cadeias produtivas;
- fortalecimento da atividade agrícola como negócio sustentável;
- investimentos em infraestrutura logística;
- estabelecimento de uma rede logística que integre os mercados fornecedores de insumos às regiões agrícolas e destes às regiões agroindustriais, e todas essas regiões produtivas aos mercados consumidores;
- políticas para desburocratizar uma série de processos de diferentes ordens.

Desde uma visão sistêmica, o que acontece com o setor agrícola, é a falta de políticas integradoras de desenvolvimento regional, que tenham como objetivos: o fortalecimento da atividade agrícola como negócio; o enraizamento dos agricultores e trabalhadores ao campo; investimentos em educação e profissionalização dos trabalhadores de campo, assim como

das suas famílias; a redução da migração rural; e investimentos em unidades e centros de saúde; integração da rede de transporte regional e nacional às áreas produtivas rurais, seja qual for a modalidade utilizada; integração da rede de armazéns em nível de fazenda e aumento da sua capacidade de armazenamento. Ou seja, é necessário que exista o envolvimento de outros setores da economia para impulsionar, melhorar e fazer mais atrativas e vantajosas as atividades agrícolas.

Diante dessa situação, os estudos que tenham essa visão sistêmica e regional são relevantes para a elaboração de estratégias e políticas para o setor agrícola. Com o intuito de contribuir com essas análises, mas desde um escopo menor e focado em uma determinada cadeia produtiva é proposto esse estudo, que tem como tema a sincronização logística da cadeia sucroenergética em função da sua demanda no mercado.

1.1 PANORAMA DO SETOR SUCROENERGÉTICO

O Brasil como o maior produtor mundial de cana-de-açúcar foi pioneiro ao implantar esta cultura como insumo para produção de um combustível renovável em larga escala. Na década de 1990, o governo forçou a redução de custos de produção por conta da desregulamentação da atividade sucroalcooleira, e nessa mesma década os biocombustíveis começaram a aparecer nas agendas, e novas tecnologias foram desenvolvidas.

A expansão do mercado mundial de açúcar e etanol estimulou o aumento do investimento no setor em todo o país (CONAB, 2021), assim como a expansão das áreas de cultivo ao longo de décadas. A produção nacional de cana-de-açúcar para a safra 2022 foi de 585,2 milhões de toneladas (CONAB, 2022). A região centro-sul, que inclui os Estados da região sudeste, sul e centro-oeste, é a que tem maior participação na produção total, cerca de 90,0%.

A produção dos derivados da cana de açúcar na região centro-sul acontece entre os meses de abril e novembro, período em que se tem menor incidência de chuvas, o que favorece a colheita e o transporte do produto in natura até a indústria. Isso é importante para garantir o abastecimento contínuo às usinas e reduzir uma série de custos logísticos e produtivos inerentes a todo esse processo de colheita e transporte.

O indicador açúcar total recuperável (ATR), representa a qualidade da cana, ou seja, a capacidade de ser convertida em açúcar ou álcool, e é medido por meio dos coeficientes de transformação de cada unidade produtiva (usina). Para calcular o ATR é considerado o preço dos produtos principais da cadeia produtiva, açúcar e etanol, de forma que quando esses preços oscilam, o preço do ATR também varia, com tendência de queda em épocas de excesso de oferta e no meio da safra. Na entressafra o movimento tende a ser o contrário.

O rendimento médio da matéria-prima foi de 133,3 quilos de ATR por tonelada de cana, com valor médio do ATR na safra de 2022 de US\$ 0,17. A produção nacional de açúcar na safra 2022 foi de 41.2 milhões de toneladas e a produção total de etanol de 29,7 bilhões de litros. A participação no Produto Interno Bruto – PIB nacional chegou a ser, quase 4%, considerando a soma das vendas dos bens finais do sistema agroindustrial da cana-de-açúcar (CONAB, 2022).

A economia do Brasil tem-se beneficiado com os investimentos no setor sucroenergético. As atividades à montante das fazendas geraram um bom faturamento às empresas fornecedoras de insumos, maquinários, equipamentos e de outros produtos necessários tanto para o preparo das terras, como para o processo de cultivo, cuidado, colheita e transporte, dentre outros. Segundo dados de UNICA (2018), no ano de 2017, o setor de insumos agrícolas faturou com o setor sucroenergético US\$ 13,2 bilhões, somente a cana-de-açúcar respondeu por 16% das vendas de fertilizantes agrícolas no Brasil; a indústria produtora de defensivos agrícolas faturou aproximadamente US\$ 850,6 milhões; e foram comercializados cerca de 3.950 tratores.

Além disso, a venda de caminhões, de capacidade acima de 40 toneladas, foi impulsionada pelo rápido crescimento do setor. Esse tipo de veículo é o responsável pelo transporte do etanol que representa aproximadamente 80% do transporte da cana de açúcar (CONSECANA, 2018). As vendas de carrocerias, reboques e semirreboques foram estimadas, segundo a UNICA (2018), em US\$ 235 milhões, que representa 12% das vendas totais da linha pesada no Brasil.

As atividades à jusante das fazendas também aqueceram o mercado. A indústria de insumos industriais faturou com o setor sucroenergético US\$ 1,5 bilhões em 2022, isso inclui fornecedores de equipamentos e empresas prestadoras de serviços de montagem. Na região

Centro-Sul a estimativa de gastos com equipamentos ficou em 63%, e com serviços 37% (CONAB, 2022).

O consumo do biocombustível na região Norte-Nordeste, cresceu 200 milhões de litros no ano de 2019, ou seja, 17% em relação ao acumulado do ano de 2018, tendo um total de 1,33 bilhão de litros. A região Centro-Sul do país, que configura a mais expressiva região produtora e consumidora, apresentou a mesma tendência de crescimento de consumo, com 15,03 bilhões de litros consumidos nos meses de janeiro a setembro de 2019, um aumento de 23.1% em relação ao mesmo período de 2018 (ANP, 2019).

Historicamente a formação do preço do etanol ocorre pela configuração de seis fatores principais, sendo eles: relação oferta e demanda; valor praticado nas bombas dos postos; preço da gasolina; mix de produção das usinas; taxa de crescimento da frota de veículos *flex-fuel* e tamanho da safra de cana de açúcar.

Segundo a ANP (2018) o aumento da demanda por etanol tende a fazer com que os preços se elevem, comportamento que pode ser observado na Figura 1.1. Entre 2015 e 2016 foi o período em que os preços do açúcar e do etanol dispararam, a oferta de etanol em 2015 apresentou-se mais restrita apesar da demanda estar aquecida, isso pelo fato de que ocorreram chuvas que prejudicaram a colheita e de certa forma mantiveram os preços do etanol elevados.

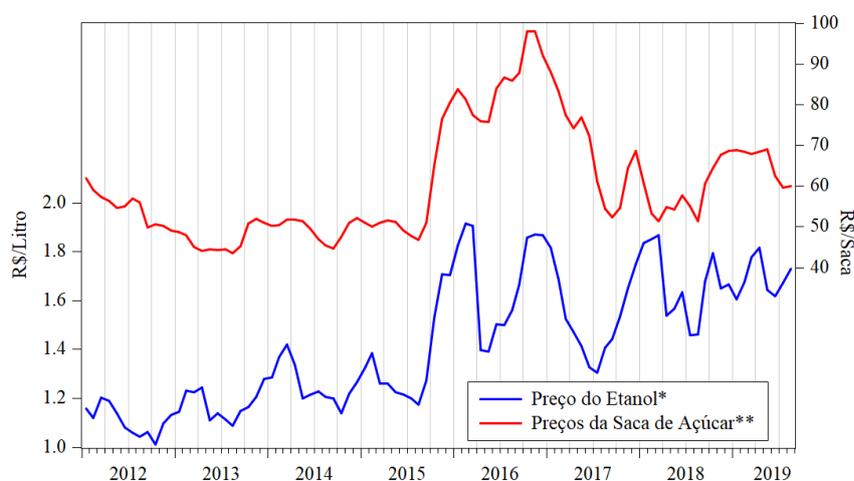


Figura 1.1 - Evolução de preços mensais de etanol e açúcar de 2012 a 2019

Nota: (*) Os preços do litro do etanol estão sem frete, sem ICMS; PIS/Cofins zerados. (**) Saca de 50 kg.

Fonte: Dados da pesquisa extraído de CEPEA/ESALQ, 2019

Os movimentos de altas nos preços do etanol a partir de 2015 também tem relações com o mercado exportador, que passou a remunerar melhor que o mercado doméstico, e com o fato

de que ocorreram mudanças na composição da gasolina, autorizado no fim de setembro desse mesmo ano, que também contribuiu para elevação da demanda por etanol (ANP, 2018).

A oferta da matéria prima cana-de-açúcar, quando reduzida, influencia diretamente na produtividade das usinas. Isso gera um efeito dominó em todo o agronegócio do açúcar e do etanol e em seus sistemas logísticos, já que afeta capacidade instalada das agroindústrias e indústrias que processam esses produtos e nos equipamentos e meios de transporte que são utilizados para movimentá-los. A falta de planejamento logístico estratégico da cadeia sucroenergética é um fator negativo, e que traz desvantagens competitivas para todo o agronegócio sucroenergético.

Em relação às usinas e suas relações com o setor produtivo, existem alguns problemas relevantes a serem considerados pela UNICA (2018), são eles:

- Falta de entendimento e de importância que o setor agrícola dá de trabalhar de forma integrada e eficiente com o setor agroindustrial;
- Baixa integração de parcerias produtivas e logísticas entre as próprias usinas para atender o mercado consumidor e manter os preços estáveis;
- Localização das áreas produtivas com as usinas, e essas aos seus mercados consumidores oneram os custos de transporte da matéria-prima pelas longas distâncias transportadas;
- Custos de manutenção da capacidade de produção ociosa quando a oferta de matéria-prima é baixa.

Diante dessa situação, é um desafio balancear a oferta de matéria prima com a capacidade instalada de produção das usinas e com a demanda do mercado consumidor, questão que afeta os preços, isso porque, às vezes, pode-se ter capacidade ociosa pela falta de matéria prima e ter forte demanda dos produtos derivados no mercado consumidor, o que influencia na alta dos preços desses produtos. Ou caso, contrário, pode-se ter falta de capacidade para processar toda a matéria prima que é empurrada às usinas

1.2. PROBLEMA DE PESQUISA

No contexto da logística de produção esta tese busca responder à seguinte questão:

É possível sincronizar os processos logísticos e produtivos com a demanda de mercado para subsidiar o planejamento e gestão de usinas sucroenergéticas no Brasil?

1.3. OBJETIVOS

1.3.1. Objetivo geral

O objetivo geral dessa pesquisa consiste em desenvolver um modelo de simulação que otimize os sistemas logístico e produtivo das usinas sucroenergéticas em função da demanda de mercado. Esse modelo de sincronização oferta-demanda permitirá subsidiar os tomadores de decisão no planejamento e gerenciamento de usinas sucroenergéticas brasileiras, buscando diminuir o impacto das oscilações dos preços do açúcar e do etanol na capacidade produtiva e logística desse setor produtivo.

1.3.2. Objetivos específicos

- Desenvolver um modelo de transmissão de volatilidade de preços para o setor sucroenergético;
- Desenvolver um modelo dinâmico dos processos logísticos-produtivos e integrar os coeficientes de transmissão de volatilidades.

1.4. JUSTIFICATIVA

Estudos como o de Becker *et al.* (2013) e Chankov *et al.* (2014) indicam que a sincronização dentro das cadeias produtivas minimiza os efeitos do *Bullwhip Effect* (efeito chicote), e que os impactos negativos oriundos da falta de sincronia geram distorções ao longo de toda a cadeia como: irregularidade de fornecimento de insumos; mais procura do que oferta por insumos; um eventual aumento do número de consumidores, que pode provocar uma ampliação do efeito ao longo da cadeia.

É importante salientar que o açúcar é um produto da cesta básica, o que torna essa discussão essencial por estar diretamente relacionada com segurança alimentar, e oscilações de quantidades ofertadas que afetam diretamente a economia das famílias e que podem gerar aumento de preços aos consumidores. O próprio uso da terra para plantio tem relevância nessa discussão, por destacar um *trade-off* de composição da produção: Quanto produzir de açúcar para alimentação? E quanto produzir de etanol para fins de uso de energia?

Portanto, esse tipo de análise que aborda a sincronização da produção de cadeias produtivas que fazem uso da mesma matéria prima é de extrema importância para o planejamento dos processos logísticos e produtivos do *agribusiness* sucroenergético. Observa-se que os dois produtos derivados são relevantes para a economia do país. Não se pode prescindir de nenhum dos dois, um deles é elemento importante na cesta básica do brasileiro e no comércio internacional, e o outro, no equilíbrio da matriz energética, como produto substituto da gasolina.

O planejamento logístico estratégico do *agribusiness* sucroenergético baseado em métodos de otimização ou de simulação para sincronizar suas cadeias logísticas e produtivas em função da demanda, permite obter resultados interessantes, confiáveis e reais, com os quais é possível traçar ações, estratégias e políticas públicas para a gestão e tomadas de decisões.

Os trabalhos que desenvolvem modelos específicos para a cadeia produtiva sucroenergética brasileira se concentram principalmente nas etapas dentro da fazenda, com a produção da cana (NUNES *et al.*, 2005). A maior parte dessas pesquisas identificou que o processo de colheita é o detentor dos maiores custos, e que existe necessidade de coordenar de forma eficiente os processos de corte mecanizado, carregamento e transporte da cana.

O planejamento logístico surge com decisões estratégicas que são tomadas e que impactam na manutenção da competitividade das cadeias produtivas. No que concerne as cadeias de suprimento, percebe-se que sua complexidade vem aumentando e faz com que o planejamento logístico se torne cada vez mais essencial para a competitividade (WANKE & ZINN, 2004).

Os estudos de competitividade de cadeias agroindustriais no Brasil estão se tornando cada vez mais comuns. Não somente por ser uma necessidade, mas também impulsionados pela própria complexidade de questões econômicas, aumento de competitividade, foco no meio ambiente entre outras diversas razões que os tornam uma exigência básica para identificar os problemas, e compreender consideravelmente os impactos na economia e para a sociedade (ALMEIDA, 2013).

Para avaliar a condição de competitividade de uma cadeia produtiva é necessário desenvolver a análise da cadeia como um todo, ou seja, nas fases antes da fazenda, dentro da fazenda e após a fazenda. No caso da cadeia sucroenergética, a fase antes da fazenda compreende a etapa dos fornecedores de insumos, máquinas e implementos. A fase nas fazendas refere-se à produção da cana-de-açúcar. A etapa após a fazenda é configurada pelas usinas na fase de produção, principalmente de etanol e açúcar, além da distribuição do etanol para uso em indústrias de bebidas e cosméticos e os postos de combustíveis. O açúcar é destinado para os mercados atacadistas, varejistas e indústria de alimentos.

Na literatura a sincronização da produção com a demanda sob a visão logística apresenta-se como solução para incrementar a eficiência e a competitividade da cadeia logística-produtiva desde a montante da fazenda até a jusante (FONSECA, 1997 e BECKER *et al.* 2013). A previsão da demanda permite o dimensionamento da capacidade produtiva e logística, assim como, prever ações estratégicas e investimentos em infraestrutura de produção, armazenamento e transporte para atender a demanda a médio e longo prazo. Essas ações fortalecem o mercado dos produtos sucroenergéticos já que sempre se conseguira manter um equilíbrio entre a oferta e a demanda.

A sincronização é um termo amplamente utilizado nos estudos de sistemas logísticos, que visa melhorar a eficiência e aumentar o desempenho de uma cadeia produtiva ao coordenar a oferta com a demanda no espaço e tempo. Os estudos de sincronização potencializam a otimização dos recursos nas ações de planejamento em meio aos elevados custos logísticos, as oscilações de preços, incerteza do ambiente, dentre outros, que afetam negativamente o agronegócio brasileiro. No entanto, esses estudos nas cadeias produtivas do agronegócio são bem incipientes (WIENDAHL, 1998; MANRUBIA *et al.*, 2004; PIKOVSKY *et al.*, 2003; CHANKOV *et al.* 2013; BECKER *et al.*, 2013).

Com esse cenário supracitado, este trabalho é relevante por desenvolver modelo de simulação que contribua com esta carência e possibilite: diagnosticar o estado atual da cadeia produtiva sucroenergética, e verificar se é possível sincronizar os processos logísticos-produtivos com a demanda.

1.5. DELIMITAÇÃO DO ESTUDO

Este trabalho se concentra nos processos logísticos-produtivos da cadeia sucroenergética brasileira e na análise da transmissão de volatilidades de preços do etanol ao longo da cadeia e gasolina no revendedor. Portanto outras atividades relacionadas com outros produtos e subprodutos da cadeia sucroenergética e sua distribuição não são relacionados no escopo deste estudo.

1.6. METODOLOGIA DA PESQUISA

A fim de atingir os objetivos supracitados, propôs-se uma metodologia dividida em três etapas, a Figura 1.2 apresenta visão esquemática resumida da metodologia proposta.

- Etapa 1: revisão da literatura;
- Etapa 2: desenvolvimento;
- Etapa 3: validação através de um estudo de caso.

Etapa 1. Esta etapa é a base do trabalho da pesquisa, já que é necessário conhecer profundamente o problema e a estado da arte para formular os objetivos do trabalho e traçar a metodologia que orienta o trabalho de pesquisa. O desenvolvimento desta etapa se apresenta nos Capítulos 1 e 2.

Etapa 2. Esta etapa compreende uma série de atividades de revisão, criação e desenvolvimento, tais como: descrição da estrutura do setor sucroenergético de uma forma bastante objetiva que permitisse destacar as principais variáveis para subsidiar o modelo de simulação; revisão dos modelos econométricos de transmissão de volatilidade que se adaptam-se ao problema formulado; estruturação do *framework* da metodologia de sincronização dos processos logísticos produtivos (Figura 1.3); desenvolvimento do modelo de transmissão de volatilidade e elaboração do diagnóstico do nível de sincronização do setor sucroenergético no Brasil, por meio de testes de volatilidade condicional e de transmissão de volatilidades com modelos econométricos GARCH-BEKK bivariados (*Generalized Autoregressive Conditional Heteroskedasticity*); e estruturação do modelo de simulação dinâmica dos processos logísticos e produtivos sincronizados com a demanda. A elaboração passo a passo de toda esta etapa é apresentada nos Capítulos 3, 4 e 5.

Etapa 3. A terceira etapa trata da aplicação do modelo proposto através de um estudo de caso em uma usina de produção de etanol, descrita e caracterizada no Capítulo 6. Também, foi desenvolvido o software *run time* do modelo para futuras aplicações, e o aplicativo mobile PWA para uso gerencial e tomada de decisões dos diferentes agentes econômicos que participam da cadeia sucroenergética. O Capítulo 7 corresponde as análises finais dos dados, conclusões e recomendações.

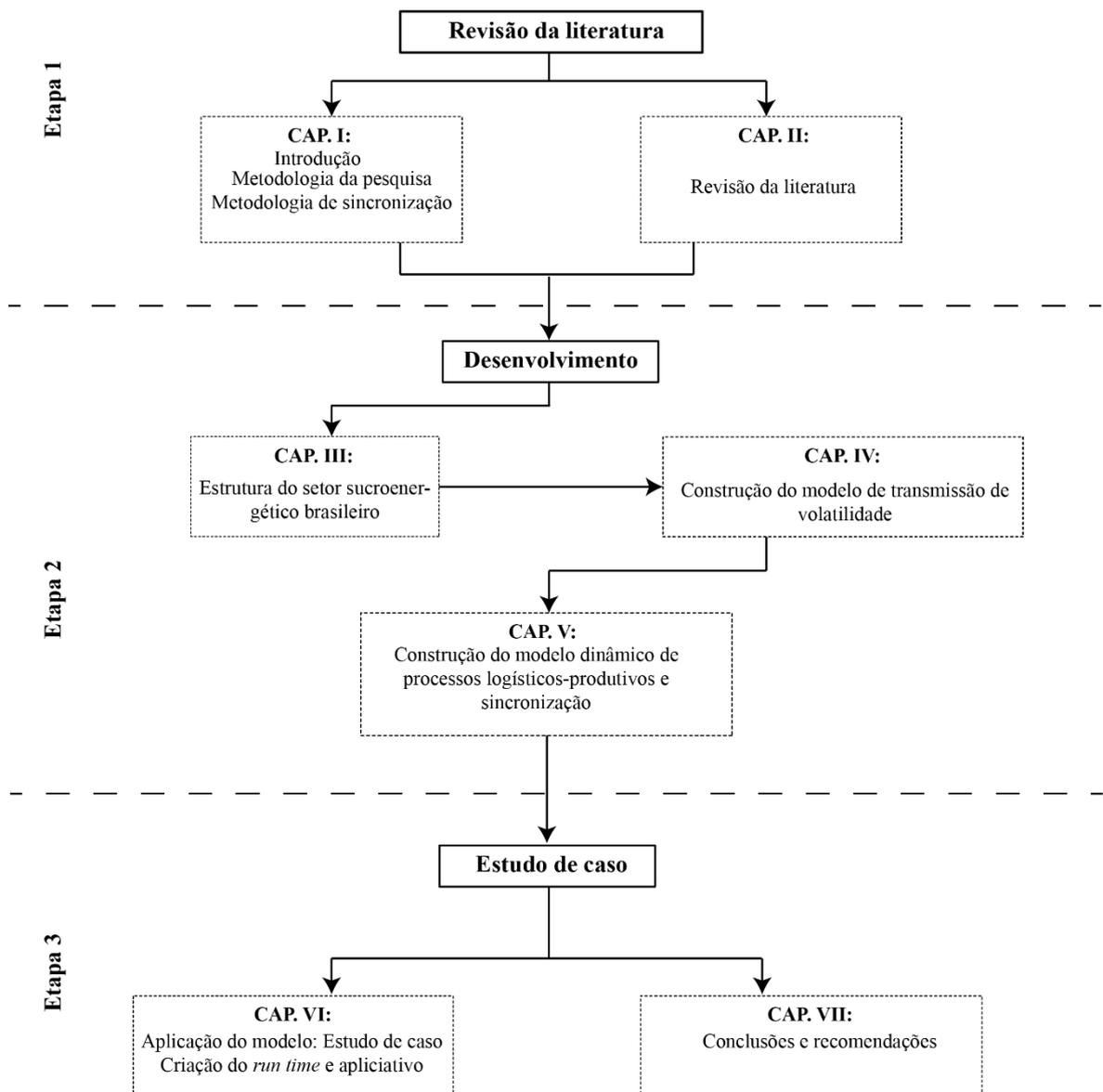


Figura 1.2 - Metodologia da tese

1.7. METODOLOGIA DE SINCRONIZAÇÃO

A Figura 1.3 é o *framework* sintetizado da metodologia é composto de 6 fases.

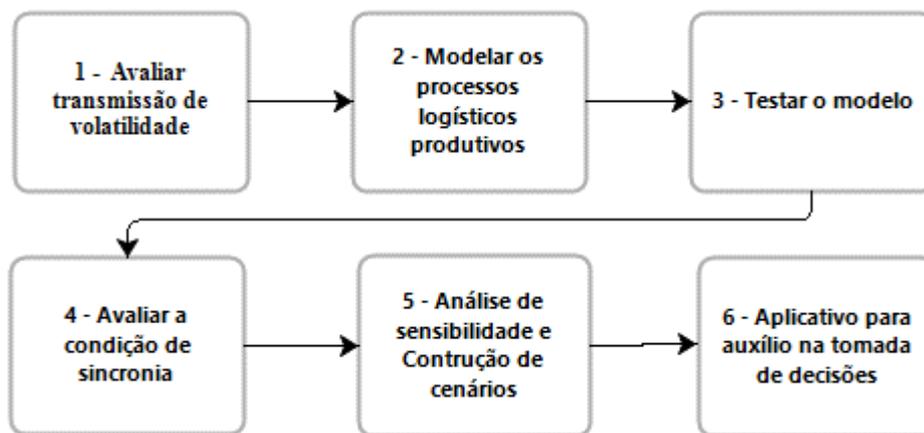


Figura 1.3 - Framework da metodologia proposta

Fase 1 - A primeira fase trata da avaliação da transmissão de volatilidade entre séries de preços. Nesse caso, constrói-se o modelo de transmissão considerando as características e comportamento das séries de preços do etanol na usina, no distribuidor, no revendedor, e da gasolina no revendedor. A série de preço da gasolina comum foi utilizada nesse modelo por conta de sua composição com 27% de etanol. Nessa fase gera-se os coeficientes de volatilidade e seus coeficientes, que são integrados ao modelo de processos logístico e de produção.

Fase 2 - Consiste na construção do modelo do processo logístico-produtivo e a modelagem da usina de produção de açúcar e etanol. As variáveis utilizadas são apresentadas na seção 5.5.4. É através dessa fase que poderão ser realizados testes de impacto das transmissões de volatilidade no sistema, para verificar as condições de sincronia, e poder identificar o grau de distorção da percepção da procura ao longo da cadeia por meio das variâncias. A análise de transmissão de volatilidade é realizada e descrita no capítulo 5.

Fase 3 - Contempla os testes do modelo na usina, estudo de caso dessa tese apresentada no capítulo 5.

Fase 4 - Na fase 4 é realizada a integração dos coeficientes de transmissão ao processo logístico-produtivo. Ou seja, consiste em testar se existe sincronização nas dimensões temporal e de performance da usina com as condições de demanda e preços. A partir desse passo são feitas as simulações de cenários para sincronia. Para calcular se as dimensões estão sincronizadas, é indicado por Becker *et al.* (2013) o uso da correlação de Cross, que faz a medida de sincronização linear entre duas séries temporais. É possível perceber o nível de interação das duas séries temporais em determinado intervalo de tempo.

Fase 5 - Compreende a construção de cenários e análises de sensibilidade.

Fase 6 - Trata do desenvolvimento do sistema gerencial de auxílio de tomadas de decisões. Compreende o desenvolvimento do *software run time* do modelo de processos logísticos-produtivos, e de um aplicativo *progressive web application*. Nesse sistema gerencial terão recursos de: indicadores, simulações e cenários.

2. REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA

A revisão sistemática da literatura contou com a metodologia *Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses*. Para identificação de artigos acerca do assunto, fez-se busca nas bases de Scielo e Google Acadêmico, de agosto a setembro de 2018, com a seguinte estratégia de busca: Sincronização de sistemas de produção logística do agronegócio sucroenergético e *synchronization of systems of logistic production of the agribusiness*.

Para inclusão dos estudos foram empregados os seguintes critérios: estudos que apresentassem técnicas de previsão (Ponderação Exponencial; Box-Jenkins; Decomposição de séries de tempo; Modelos de regressão; Modelos econométricos; Simulação dinâmica; Redes neurais), nos quais tivessem associação com sistemas de logística no agronegócio. Após a fase de identificação foram excluídos os estudos duplicados.

Na fase de triagem foram lidos os resumos dos estudos, para os casos em que a leitura não proporcionou insumos suficientes para estabelecer se o estudo deveria ser incluído, baseando-se nos critérios de inclusão, fez-se a leitura integral do artigo a fim de definir sua inclusão (Figura 2.1). No processo de extração dos dados dos artigos, desenvolveu-se um instrumento com as seguintes informações: autores, ano de publicação, local de publicação, tipo de modelo, aplicação. A análise dos estudos encontrados foi realizada de forma descritiva tratando de: ano, autoria, local do estudo, tipo de estudo, objeto, delineamento do estudo, como mostra-se no Quadro 2.1.

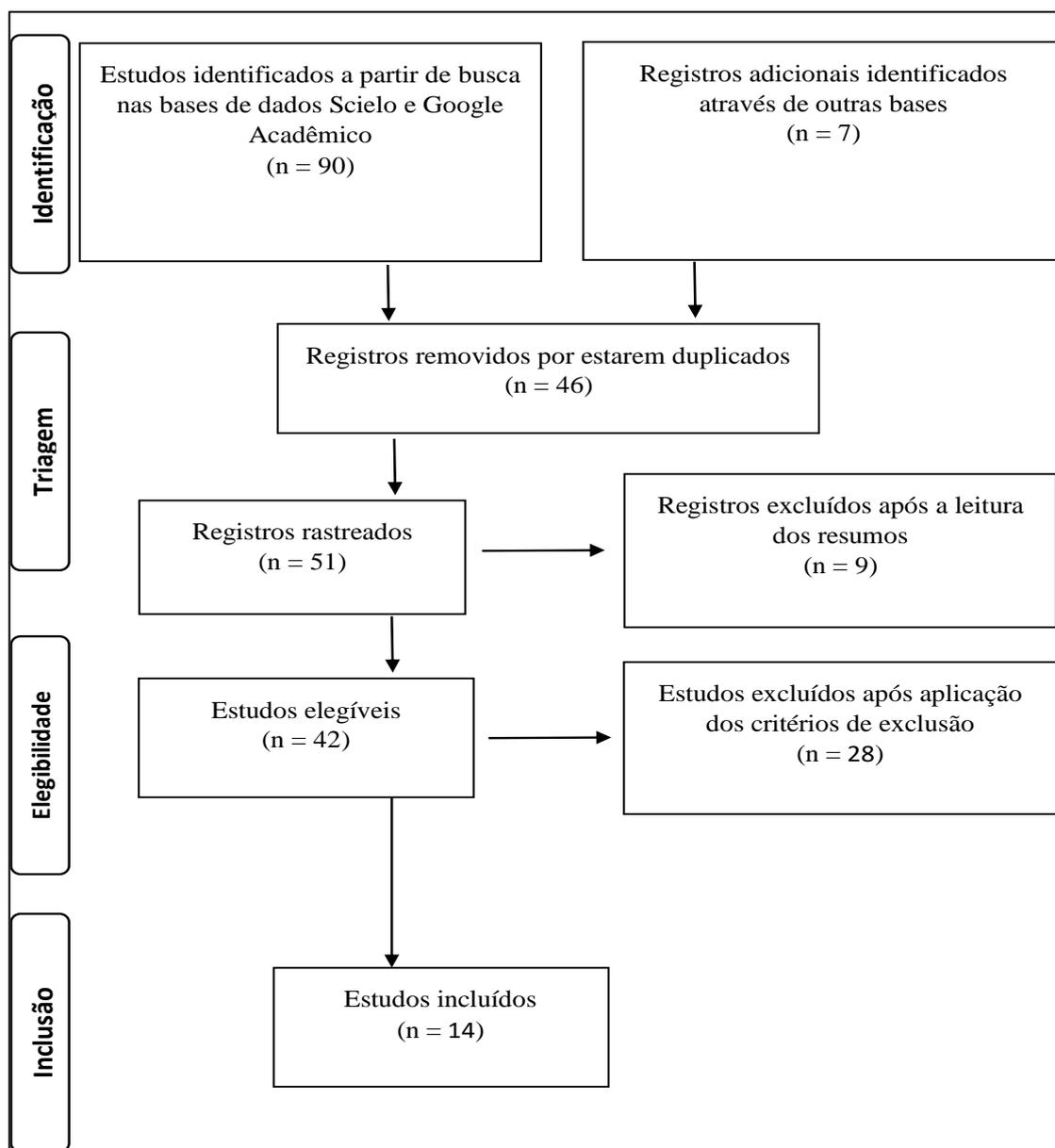


Figura 2.1 - Fluxograma de identificação e seleção de artigos para revisão sistemática

Quadro 2.1 - Sistematização de pesquisas

Código	Autor, ano (referência)	Local/Instituição	Modelo	Aplicação
1	Fastabend, H., 1997	Leibniz Universität Hannover	Sincronização dinâmica	Indústria automotiva
2	Manrubia <i>et al.</i> , 2004	Londres: World Scientific	Sincronização de sistemas complexos	Organização populacional urbana
3	Pikovsky, <i>et al.</i> , 2003	Cambridge University	Sincronização dinâmica	Sistemas diversos (conceitual)
4	Becker <i>et al.</i> , 2013	Jacobs University Bremen	Sincronização logística	Indústria
5	Chankov <i>et al.</i> , 2014	Jacobs University Bremen	Sincronização logística	Sistemas diversos (conceitual)

6	Chankov <i>et al.</i> , 2016	School of Industrial Engineering, Purdue University - USA	Sincronização de processos logísticos	Influência dos sistemas manufatureiros
7	Oiticica, 2009	Universidade Federal de São Carlos	Programação matemática e otimização robusta	Usinas sucroenergéticas
8	Silva <i>et al.</i> , 2013	Universidade Estadual Paulista	Programação por metas binária	Usinas sucroenergéticas
9	Marins, 2013	Universidade Estadual Paulista	Modelos multiobjectivos	Usinas sucroenergéticas
10	Morabito, 2012	Universidade Federal de São Carlos	Programação matemática e otimização robusta	Usinas sucroenergéticas
11	Sotolani, 2015	Universidade Federal da Grande Dourados	Gestão da cadeia de suprimentos	Usinas sucroenergéticas
12	Castilho, 2013	Universidade Federal da Grande Dourados	Gestão da cadeia de suprimentos	Usinas sucroenergéticas
13	Silva <i>et al.</i> , 2011	Universidade Estadual Paulista	Pesquisa operacional	Usinas sucroenergéticas
14	Perá <i>et al.</i> , 2014	Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz	Pesquisa operacional	Usinas sucroenergéticas

2.1. SISTEMAS LOGÍSTICOS

De acordo com Lambert, et al. (1999), o *Council of Logistics Management* (CLM) em 1986, definiu logística como o processo de planejamento, implementação e controle de fluxo eficiente e eficaz de matérias-primas, estoques de produtos semi-acabados, produtos acabados e do fluxo de informações relacionado a todo processo, considerando da origem ao consumo.

O fato é que no meio empresarial nunca se falou tanto em logística como agora. Seja pela preocupação com os custos ou em decorrência de maior competição para atender ao mercado consumidor com prazos de entrega, garantindo assim um melhor serviço ao cliente de modo geral. “Os custos logísticos são um fator chave para estimular o comércio [...]. Quanto menos onerosas forem suas movimentações e armazenagens, mais livre será a troca de mercadorias e maior será a especialização do trabalho” (BALLOU, 1993).

Existem diversos fatores que necessitam ser avaliados como demanda, serviço ao cliente, as características dos produtos, os custos logísticos e transporte e armazenagem (AMBROSINO & SCUTELLÀ, 2005; BALLOU, 2006; BOWERSOX *et al.*, 2006; FIGUEIREDO *et al.*, 2003). Os custos de transporte são os mais facilmente detectados, e com grande representação no custo logístico total, atingindo até 30% (BALLOU, 2006;

BOWERSOX *et al.*, 2006; FIGUEIREDO *et al.*, 2003). As funções principais do transporte estão relacionadas às dimensões de tempo e utilidade de lugar, objetivando atender a demanda, dentro do prazo adequado.

Custos de armazenagem, têm normalmente, a segunda grande parcela de participação no custo logístico total, muitas vezes essa situação se dá pelos custos de abertura e operações das instalações (WANKE, 2003). Ballou (2006) destaca os custos de oportunidade de manutenção de estoques, esse custo é apresentado principalmente na literatura internacional.

Bowersox (2014) define que, no ambiente competitivo no qual as empresas estão inseridas é necessário que apresentem comportamento integrador, com clientes e fornecedores. A denominação para essa integração ao ambiente externo é conhecida como a fase moderna da logística e, nomeada de Gerenciamento da Cadeia de Suprimentos (*Supply Chain Management-SCM*).

Uma definição bastante interessante e que compõe a visão de Bowersox é a de Fleury *et al.* (2000), em que definem o SCM como um esforço colaborativo de membros de diversos canais para projetar, implementar e administrar processos de valor agregado a fim de atender e satisfazer as reais necessidades do cliente final. Bowersox e Closs (2001) trabalham a ideia de competitividade do canal com duas premissas, a primeira trata que o comportamento cooperativo reduz o risco e melhora a eficiência de todo processo logístico, e a segunda foca na redução das redundâncias e do trabalho inútil.

Na literatura apresenta-se o termo sistemas logísticos envolvendo a integração e otimização do fluxo da informação, a distribuição, a alocação de recursos, a embalagem e o manuseio de materiais (RODRIGUE *et al.*, 2001). O desenvolvimento do sistema logístico está condicionado por três fatores principais: procedimentos organizacionais, sistemas e pessoas.

Os estudos dos sistemas logísticos de cadeias agroindustriais necessitam, além de observar o aprimoramento da tecnologia de informação e o alinhamento dos procedimentos e rotinas organizacionais, considerar as estratégias de aperfeiçoamento dos funcionários que desempenham funções diversas nos segmentos da cadeia (CHANDRASEKARAN & RAGHURAM, 2014).

Nos sistemas logísticos, os gestores necessitam identificar os processos internos críticos em que as empresas buscam atingir excelência. Os indicadores de desempenho nos sistemas estão focados nos processos que tem maior impacto nos clientes e nos objetivos financeiros das empresas da cadeia produtiva. A proposta de trabalhar com eficiência nos sistemas logísticos deve adotar a gestão de custos, aceitando a premissa de custeio de todas as atividades do sistema. As informações monetárias de custeio de todas as atividades da cadeia produtiva são usadas na avaliação de sua eficiência e eficácia à montante e à jusante.

No agronegócio brasileiro as redes logísticas de comercialização e distribuição dos diferentes produtos agropecuários apresentam problemas distintos aos dos produtos industrializados, principalmente por: incerteza do ambiente de produção, sazonalidade, estoques empurrados no mercado; especulação de preço, utilização imprópria de veículos de transporte, subutilização da capacidade dos veículos ou em muitos casos superutilização dela; racionalização de recursos, problemas nas negociações, dentre outros (BATALHA & SOUZA FILHO, 2009; VAN DER VORST, 2000).

2.2. SINCRONIZAÇÃO LOGÍSTICA

Existem várias visões a respeito da sincronização e estão condicionados a diferentes aspectos. A primeira visão de sincronização refere-se as atividades que ocorrem ao mesmo tempo, ou seja, uma visão temporal. Um segundo enfoque é o causal, em que eventos desencadeiam outros eventos, implicando algum tipo de interação, correlação ou acoplamento.

Pikovsky *et al.* (2003) definem a sincronização como “ajustes de ritmos por meio da interação”. Já os pesquisadores Manrubia *et al.* (2004) falam que ela ocorre quando os “sistemas recebem correções fortes em seus estados dinâmicos internos”. As abordagens principais se concentram nas abordagens matemáticas como forma de quantificar a sincronização, com ênfase na observância do comportamento harmoniosos exibido pelo sistema.

O modelo proposto por Kuramoto (1984) quantifica a sincronização considerando sistemas como osciladores de fase, e quando comparando os comprimentos das fases de cada um desses sistemas é possível medir o nível de sincronização, sendo chamado por sincronização

de fase (KURAMOTO, 1984; PIKOVSKY *et al.*, 2003; BECKER *et al.*, 2013). As oscilações podem ter causas internas do sistema ou externas, ou seja, visão endógena quando a sincronização é por um fenômeno auto emergente no sistema causado por interações internas, e por outro lado, a visão exógena ocorrendo por meio de fatores externos (Quadro 2.2).

Na ótica da sincronização é necessário existir um plano de produção sincronizado baseado na capacidade de fabricação e níveis de estoque atual. Este tipo de produção deve estar coordenado com a análise da previsão de demanda futura, sendo essa a informação que definirá o que produzir, para quem produzir e o quanto produzir (CHING, 2010; POTTER, 1996). A sincronização permite ilustrar a capacidade dos estoques usados para atender a demanda; proporciona determinar a flexibilidade e eficiência em atender a essa demanda (CHING, 2010).

Além dessas óticas, a sincronização pode ocorrer entre processos em execução nos sistemas, como os produtivos, transporte, suprimentos etc. A visão do objeto considera a natureza dos itens que podem ser sincronizados no sistema e as características que os permitem atuar em sincronia. Essas últimas visões estão fortemente relacionadas as definições de sincronização logística (MANRUBIA *et al.*, 2004).

Quadro 2.2 - Visões da sincronização

Definições de sincronização	Temporal	Causal	Endógeno	Exógeno	Processo	Objeto
Capacidade de objetos de natureza diferente para formar um regime de operação comum devido à interação (Osipov <i>et al.</i> , 2007)		x	x	x		x
Ajuste de ritmos devido a interação (Pikovsky <i>et al.</i> , 2003)	x	x				
Correlações fortes entre estados dinâmicos internos (Manrubia <i>et al.</i> , 2004)		x	x			
Coordenação de fluxos (Fastabend, 1997)				x	x	
Acoplamento de entrada-saída (Wiendahl, 1998)		x	x		x	

Sincronização logística trata do balanceamento entre o fornecimento de um produto e a demanda do cliente, a quantidade de fornecimento deve estar adequada à demanda de clientes, isso proporciona menores custos globais para a empresa. A sincronização ocorre quando um fluxo orientado de coordenação está presente na logística e a produção da cadeia (FASTABEND, 1997).

Na visão de Wiendahl (1998) a sincronização logística é o acoplamento de saída-entrada, ou seja, uma determinação precisa dos inputs e outputs, e de acordo com Manrubia *et al.* (2004), sistemas estão sincronizados quando correlações rígidas entre suas variáveis dinâmicas aparecem. A correlação é resultado de um alinhamento do sistema, o qual exhibe comportamento oscilatório.

Os pesquisadores Chankov *et al.* (2013) abordam a sincronização em sistemas logísticos como sendo um fenômeno observável e quantificável, que representa a ligação temporal de diferentes elementos do sistema logístico e, relacionados com o desempenho dos processos e as interações, podendo ocorrer dentro de um único sistema ou em vários sistemas logísticos.

Logística na visão de Plowman (1964) significa garantir disponibilidade dos bens considerando: valor, condição, lugar, momento e custos de maneira assertiva. Nessa ótica a logística alinha as atividades no tempo e espaço, então uma determinada porção de sincronização é esperada para o sucesso das operações logísticas.

Alguns conceitos estabelecidos na logística estão relacionados à sincronização: *Takt time* que é definido como o tempo que se deve produzir um componente ou produto, baseado no ritmo de vendas; na filosofia *just in time*, trata dos componentes corretos entregues no momento e na quantidade necessárias para produção. Alguns autores consideram que a produção sincronizada é semelhante ao *just in time* (ÔNO, 1998).

Existem conceitos no campo de gestão da cadeia de suprimentos que incorporam: colaboração da cadeia de fornecimento, coordenação da cadeia de abastecimento e integração da cadeia de suprimentos (STEVENS, 1989; DESHMUKH, 2008; ZHANG, 2011). Segundo Simatupang e Sridharan (2002) a noção de fornecimento sincronizado relaciona-se ao fornecedor que assume o controle do reabastecimento de estoque do cliente.

A colaboração da cadeia de fornecimento indica que duas ou mais empresas independentes atuam em conjunto no planejamento e execução da cadeia de suprimentos. Na medida em que os atores participantes se envolvem na cadeia de abastecimento ocorre o compartilhamento de informações e sincronização de decisões (coordenação da cadeia de abastecimento).

A integração da cadeia de suprimentos descreve a “intensidade” e como são os relacionamentos dos agentes dentro da cadeia de suprimentos, como envolve alinhamento total de objetivos é raro acontecer integração de maneira real (Quadro 2.3). O *cross docking* é o processo de distribuição onde a mercadoria recebida é redirecionada sem uma armazenagem prévia, movendo produtos através de centros de distribuição, e pode atuar como elemento/estratégia de ajuste de sincronia do sistema.

Quadro 2.3 - Conceitos relacionados com a sincronização

Definições de sincronização	Takt	JIT	Produção sincronizada	Fornecimento sincronizado	Coordenação de SC	Cross docking
Capacidade de objetos de natureza diferente para formar um regime de operação comum devido à interação (Osipov <i>et al.</i> , 2007)				x		
Ajuste de ritmos devido a interação (Pikovsky <i>et al.</i> , 2003)	x					
Correlações fortes entre estados dinâmicos internos (Manrubia <i>et al.</i> , 2004)		x				
Coordenação de fluxos (Fastabend, 1997)		x	x			
Acoplamento de entrada-saída (Wiendahl, 1998)		x	x			x

2.3. MODELOS DE SIMULAÇÃO NO SETOR SUCROENERGÉTICO

A simulação no setor sucroalcooleiro vem sendo utilizada para desenvolver novas estratégias do ponto de vista gerencial, otimizações de tempos de produção, transporte e equipamentos

(YOSHIZAKI, 1989; MATHEW & RAJENDRAN, 1993; HAHN, 1994; LOPES, 1995; YAMADA, 1999).

Em 1992 Barata desenvolveu um modelo de avaliação técnico-econômica sobre reforma de canaviais utilizando programação linear. Mathew e Rajendran (1993) apresentaram um modelo de análise de atividades de manutenção de usinas de açúcar, em que se objetivava observar e determinar os intervalos ideais entre as paradas para manutenção da usina. No ano 1995 outro trabalho de destaque foi o de Lopes (1995) que modelou um sistema de transporte, considerando carregamento e reboque com o objetivo de identificar, categorizar e analisar variáveis relacionadas aos custos das operações.

Yoshizaki *et al.* (1996) desenvolveram um modelo de programação linear para estudar o problema de distribuição centralizada de álcool no sudeste do Brasil. Higgins *et al.* (1998) fizeram uma aplicação de uma modelagem de programação matemática para programação da colheita de cana-de-açúcar.

Já Yamada (1999), Colin *et al.* (1999) também desenvolveram modelos interessantes de simulação. O primeiro fez uso de redes Petri atemporizadas para modelar as etapas de produção de açúcar e álcool, buscando validar a utilização desta técnica para as etapas discretas quanto para as etapas contínuas desse processo produtivo. Colin *et al.* (1999) fizeram um modelo utilizando programação linear com o objetivo de otimização do sistema logístico nos processos de distribuição e armazenagem de açúcar.

Modelos de programação linear foram utilizados para estudar decisões relativas ao transporte e estocagem de açúcar e álcool (KAWAMURA *et al.*, 2006). Iannoni e Morabito (2006) desenvolveram um sistema focado na recepção de cana com uso de simulação discreta analisando o transporte de cana.

Outros trabalhos interessantes se destacaram ao longo das últimas décadas apresentando modelos e métodos de otimização aplicados à integração, programação do corte de cana considerando a matéria prima até a usina e modelos econométricos para desenvolvimento de projeção de preços (COCK *et al.*, 2000; HIGGINS *et al.*, 2004; MILAN *et al.*, 2006).

2.3.1. *System dynamics*

System Dynamics é uma metodologia de modelagem matemática utilizada para analisar sistemas complexos. Começou a ser desenvolvido ao final da segunda guerra mundial, quando o professor Jay Forrester do *Massachusetts Institute of Technology*-MIT se dedicou em criar um simulador de combate aéreo para marinha dos Estados Unidos, na medida em que o projeto do simulador foi se desenvolvendo Forrester percebeu que a aplicação se daria melhor nos testes de sistemas de informação de combate.

Entre os anos de 1950 a 1960, Forrester e sua equipe de estudantes evoluiu muito o campo da dinâmica de sistemas, passando muito da simulação de mão para total modelagem computacional. Em 1961, Jay Forrester do MIT, começa a lançar as primeiras publicações que envolvem o conceito do *system dynamics*, um desses trabalhos foi o livro *Dinâmica Industrial (Industrial Dynamics)*, em que são apresentadas as primeiras ideias sobre dinâmica de sistemas aplicada a indústria.

Entende-se que um sistema basicamente pode ser compreendido por possuir seus elementos com funções específicas que se inter-relacionam (relações funcionais dinâmicas) e as interações desses elementos em conjunto tem, logicamente, um propósito. Johnson, *et al.* (1963) definem sistema como um todo complexo e organizado; uma reunião de coisas ou partes formando um todo unitário e complexo; o ponto central dessa definição proposta por esses autores é que um sistema é uma ideia de plano, ordem, ou seja, um arranjo que tem como seu contrário o caos.

Existem vários tipos de modelos, que podem ser análogos, físicos ou simbólicos (Figura 2.2). Os modelos análogos representam relações da realidade de forma análoga a sistemas físicos, os modelos icônicos ou físicos são modelos em ambiente real, podendo ser em escala reduzida como um sistema de barragem ou simulador de voo. Modelos de simulação apresentam diferenças em sua forma de uso, podendo ser de duas formas, computadorizados ou manual, mas em sua maioria ocorrem com uso de computadores (LOURENÇO, 1981; PERIN FILHO, 1995).

As técnicas utilizadas na simulação variam de acordo com o modelo utilizado, entre elas tem-se:

- Numéricas que empregam processos de tentativas, ensaio e erro, e diversos valores das variáveis são alocados, substituídos e são construídos indicadores de desempenho que são comparados a fim de determinar em quais condições é maximizada a eficácia.
- Analíticas é comportada por instrumentos matemáticos como álgebra e cálculo.
- Monte Carlo aplicáveis a modelos estocásticos, com técnicas complexas em que uma variável é apresentada por uma série de dados.

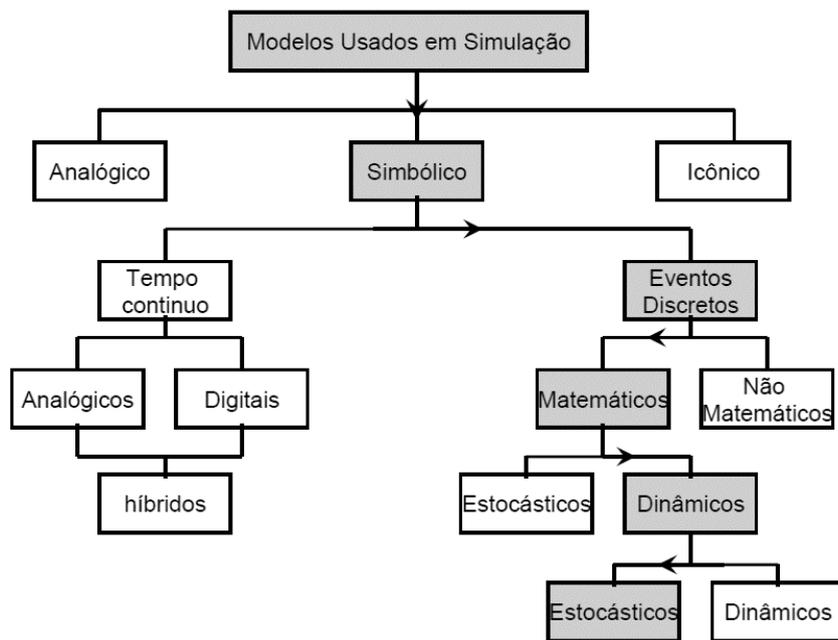


Figura 2.2 - Principais características das modelagens HARD e SOFT

Fonte: Adaptado de Harling & Bruce (1971).

Nos modelos de simulação, quanto ao tipo de pesquisa, as técnicas que se destacam são:

- Exame por evento que consiste em determinar o momento que cada evento de significância ocorre no sistema.
- Exame temporal em que as condições do sistema são determinadas pelos intervalos regulares, ou programação direcionada para atividades que são constantemente atualizadas.
- Modelos de eventos discretos que se referem a sistemas onde ocorrem mudanças de estado em pontos discretos no tempo.
- Mudança contínua em que o estudo ocorre em fluxo contínuo de informações com bancos de dados com tempo de formação contínua.

Os modelos de simulação apresentam outra característica importante no que se refere aos elementos do sistema e suas interações. Essa característica é conduzida por dois sistemas: determinístico e estocástico. No primeiro todas as variáveis são definidas com precisão matemática, e valores determinados com pontualidade, os estocásticos apresentam variáveis que são consideradas aleatórias e definidas através de várias amostras, e se baseia normalmente em decisão aproximada e complexa da realidade (SALIBY, 1989).

Considerando como pressuposto que a linguagem modela a percepção, uma linguagem nova acarretaria novas formas de pensar, que possivelmente facilitariam o entendimento dos sistemas complexos dinâmicos (SENGE, 1990). A partir dessa suposição saberíamos que existiria uma quebra no pensamento linear, pressupondo assim que as relações de causa-efeito impossibilitariam a percepção de situações que envolvem a complexidade dinâmica (ANDRADE, 1997).

Existem duas formas de modelagem utilizadas na caracterização de um modelo em *system dynamics*: a abordagem *HARD* que faz uso de modelos quantitativos, desenvolvidos por Forrester, e a outra abordagem é a *SOFT*, que utiliza modelos qualitativos utilizados por Senge (2000), apresentadas no Quadro 2.4. É importante ressaltar que as abordagens não são excludentes, em muitos casos os modelos qualitativos são utilizados no início para estruturação, posteriormente os modelos quantitativos são acrescentados.

Quadro 2.4 - Principais características das modelagens HARD e SOFT

Modelos	Hard	Soft
Definição do modelo	Representação da realidade	Método para gerar debate e insights da realidade
Definição do problema	Exigência de objetivo claro dimensão bem definida	Múltiplas dimensões
Agentes e organizações	Não são considerados	Faz parte do modelo
Dados	Quantitativos	Qualitativos
Objetivo	Soluções e otimizações	Insights e aprendizagem
Resultados	Recomendações	Aprendizagem em grupo ou autodesenvolvimento

Fonte: Adaptado de Forrester (1990).

Forrester (1961) aponta que a modelagem utilizando somente modelos qualitativos não possui capacidade de entender o comportamento de um sistema complexo e somente pela simulação é que se pode realmente fazer a verificação do comportamento do sistema.

No modelo *SOFT* ou diagrama de enlace causal o objetivo é identificar e observar as características estruturais das variáveis principais, se atentando para as relações de causa e efeito e as estruturas de *feedback*¹. Sterman (2000) afirma que o próprio diagrama de enlace causal tem um importante papel na modelagem, pois servem de esboço de hipóteses causais e auxiliam na identificação prévia de pressupostos estruturais.

2.3.2. Conceitos e modelos de transmissão de volatilidades

Os modelos de transmissão de volatilidades são utilizados para compreender o comportamento de variáveis, e auxiliar nas tomadas de decisões estratégicas de preços e processos gerenciais, planejamento de produção, compra de equipamentos. No agronegócio faz-se amplo uso de diversos tipos de análises econométricas afim de se estabelecer embasamento para tais tomadas de decisões, e nessa pesquisa aprofundou-se no estudo dos principais modelos de transmissão de volatilidade para compreender as limitações históricas que ocorreram e escolher de forma coerente quais modelos melhores se aplicam a realidade do setor sucroenergético.

Na literatura as volatilidades e os retornos associados a séries temporais apresentam propriedades empíricas conhecidas como fatos estilizados $1F^2$, que possuem as conhecidas caudas pesadas (*fat tail distributions*); reversão média e assimetria (*asymmetry and mean reversion, leverage effect*); co-movimento das variâncias (*co-movements of volatilities*); agrupamento de volatilidade (*volatility clustering*). (RAMCHAND & SUSMEL, 1998; MANDELBROT, 1963; FAMA, 1965; BLACK, 1976).

Em 1982, Engle baseando-se na metodologia desenvolvida por Box-Jenkins (1976), desenvolveu um modelo de variância condicional como um processo autorregressivo, do tipo ARMA (*Autoregressive Moving Average*), chamado ARCH (*Autoregressive Conditional Heteroskedasticity*). Em 1986 Tim Peter Bollerslev introduziu o modelo que incorporava a variância condicional ao modelo ARCH, conhecido por GARCH (*Generalised*

¹ Refere-se aos ciclos de realimentação do modelo.

² Para mais detalhe acerca dos fatos estilizados e suas implicações veja por exemplo, Bollerslev, Engle e Nelson, 1994, Satchell e Knight, 2007, Zivot 2002, Malmsten e Teräsvirta, 2004, Enders, 2010 e Bauwen, Hafner, e Laurent, 2012.

Autoregressive Conditional Heteroskedasticity).

Assim, o modelo GARCH trabalha com a variância passada como variável explicativa, e o modelo ARCH faz uso da variância condicional corrente como função dos choques passados. Em termos práticos, o modelo GARCH considera a variância corrente não somente em função dos choques passados, mas também as variâncias passadas.

Embora o modelo GARCH convencional seja capaz de capturar o agrupamento de volatilidade, ele não dá conta da assimetria. O GARCH convencional tem como pressuposto implícito que o efeito dos choques sobre a volatilidade é simétrico. No entanto, é de conhecimento generalizado que choques negativos geram mais volatilidade que os choques positivos de mesma magnitude (BLACK, 1976; NELSON, 1991; CHRISTIE, 1982).

Vários modelos foram desenvolvidos para superar a deficiência do modelo GARCH convencional. Os mais proeminentes são o EGARCH de Nelson (1991), o GRJ-GARCH de Glosten *et al.* (1993) e o T-GARCH de Zakoïan (1994). A família de modelos GARCH são agora capazes de lidar com os fatos estilizados mais importantes, tais como cluster de volatilidade, distribuição de caldas grossas, reversão a média e assimetria, (ZIVOT, 2008).

Eles têm sido utilizados para obtenção da variância condicional de série financeiras, muito útil para precificação de títulos, calcular *value at risk*, razão de *hedging*, gerência e alocação de portfólio, análise de prêmio de riscos (CAPM), assim como regulamentação do mercado financeiro (ENGLE 1993, 2001; POON & GRANGER, 2003; POON 2005). É inquestionável o sucesso dos modelos GARCH. Entretanto, é vastamente conhecido que volatilidades financeiras de ativos e de diferentes mercados se movem juntos ao longo do tempo (BAUWENS, *et al.*, 2006). O reconhecimento deste fato implica que uma modelagem multivariada produz modelos empíricos mais apropriados do que trabalhar com modelos univariados separados (BAUWENS, *et al.*, 2006).

Para analisar a relação entre mercados, as metodologias univariadas, normalmente, estimam a variância condicional de série X como variável explicativa da variância condicional da série Y, ou vice-versa ignorando a existência causalidade entre as volatilidades em ambos os sentidos e deixando de explorar covariância entre as séries (SORIANO & CLIMENT,

2005). Uma maneira mais adequada de se estimar interações entre as volatilidades de n séries temporais e explorar suas covariâncias é estimar um modelo GARCH multivariado, MGARCH (SORIANO & CLIMENT, 2005).

Neste caso, variâncias e covariâncias das n séries são estimadas simultaneamente, geralmente usando máxima verossimilhança (ML, *Maximum Likelihood*). Engle, Granger e Kraft (1984) foram os primeiros pesquisadores a introduzir um modelo GARCH bivariado. Por outro lado, foi o modelo Baba-Engle-Kraft-Kroner (BEKK) de Engle e Kroner (1995), que introduziu uma análise rigorosa das propriedades teóricas de modelos GARCH multivariados (MGARCH).

A partir de então, os modelos MGARCH têm-se ampliado sua aplicabilidade. Uma revisão crítica de literatura a respeito dos modelos MGARCH pode ser encontrada em Almeida *et al.* (2015), a qual atualiza as revisões de Bauwens *et al.* (2006) e Silvernoinen e Terasvirta (2009).

2.3.2.1. Aplicações dos modelos de volatilidades

A aplicação mais óbvia de modelos MGARCH é o estudo das relações entre as volatilidades e co-volatilidade de vários mercados. O que compreende saber: se a volatilidade de um mercado afeta a volatilidade de outro mercado; se um choque ocorrido em mercado afeta a volatilidade de outro mercado; se a volatilidade de um ativo afeta a volatilidade de outro ativo dentro de um mesmo mercado; se o impacto de choques negativos e positivos provocam uma mesma amplitude nas volatilidades; se as correlações entre os retornos de ativos mudam com o tempo e como estas correlações se comportam durante períodos de alta volatilidade (BAUWENS *et al.*, 2006).

Uma segunda aplicação natural dos modelos MGARCH é o cálculo da razão do hedge ótimo condicionado ao tempo. Tradicionalmente, as razões de hedge ótima de commodities consiste em tomar a inclinação da regressão linear, usando OLS (*Ordinary Least Squares*) do retorno *spot* sobre os retornos futuros, o que, por sua vez, é equivalente a estimar a razão entre a covariância entre preço *spot* e preço futuro e a variância do preço futuro (HULL, 2012).

A abordagem convencional, OLS, assume que o segundo momento seja constante no tempo. No entanto, está bem estabelecido na literatura que os retorno de ativos financeiros exhibe cluster de volatilidade (MANDELBROT, 1963) e co-movimento (RAMCHAND & SUSMEL, 1998; BLACK, 1976). O que implica na necessidade de se utilizar modelos que possam capturar simultaneamente a variância e covariância condicionais dos retornos spot e futuros.

Uma terceira aplicação natural do MGARCH são os modelos CAPM (*Capital Asset Pricing Model* ou Modelo de Avaliação de Ativos Financeiros) desenvolvido por Sharpe (1964). O modelo de Sharpe considera que um o excesso de retorno de um ativo de risco em relação ao retorno de um ativo sem risco pode ser expresso como uma função linear do retorno do mercado. Assumindo o segundo momento como constante, a tangente, ou coeficiente b , pode ser estimado utilizando OLS.

Como no caso da razão de hedge ótima, desde que b constitui a razão entre covariância entre retorno do ativo e o retorno do mercado e a variância do retorno do mercado, modelos MGARCH podem ser utilizados para se obter estimativa de b variando no tempo em vez de tomá-la como constante, estimando simultaneamente as variâncias e covariâncias³.

Uma quarta aplicação natural compreende alocação e gerência de portfólio. Os retornos da carteira podem ser calculados diretamente a partir da composição dos ativos na carteira e seus respectivos retornos. Um modelo GARCH univariado de cada participante da carteira e os seus respectivos retornos é suficiente obter o retorno condicional da carteira. Contudo se os pesos mudam, o modelo deve ser reestimado. Ao contrário, quando um modelo GARCH multivariado é utilizado, a distribuição multivariada dos retornos pode ser utilizada diretamente para calcular a distribuição implícita de qualquer carteira. Não haveria necessidade de reestimar o modelo para os diferentes vetores de peso (BAUWENS *et al.*, 2006).

Uma quinta aplicação natural diz respeito ao cálculo do *Value at Risk* (VaR). *Value at Risk* é uma das medidas mais importantes de risco de mercado e tem sido amplamente utilizada

³ Veja clássicos exemplos em Bollerslev *et al.* (1988), De Santis e Gerard (1998), Hafner e Herwartz (1998).

para gestão de risco por parte das instituições financeiras. Desde que o grupo de gestão de risco em J. P. Morgan desenvolveu o modelo *RiskMetrics* para medir VaR em 1994, ele tornou-se um ponto de referência para medir o risco de mercado (MANGANELLI, 2001).

Nessa abordagem mede-se a perda máxima potencial do valor de uma carteira de ativos durante um período determinado considerando uma determinada distribuição de probabilidade dos retornos. Embora amplamente utilizado como uma medida de risco têm sido objeto de críticas devido à sua incapacidade de incorporar alguns fatos estilizados, a saber: (a) a presença de agrupamento volatilidade, indicado pela alta autocorrelação dos retornos absolutos e dos retornos ao quadrado, (b) o excesso de curtose (caudas gordas nas distribuições dos retornos) e (c) assimetria na densidade da distribuição incondicional dos retornos (BRAIONE & SCHOLTES, 2016).

Os modelos do tipo GARCH são apropriados para estas aplicações porque podem capturar estes fatos estilizados. Dada a estimativa de um modelo GARCH univariado de uma série de retornos, conhece-se a distribuição condicional desses retornos, e pode-se, portanto, prever valor em risco (*Value at Risk*, VaR) de uma posição longa ou curta (GIOT & LAURENT, 2003). No entanto, a presença de um outro fato estilizado importante, co-movimento entre ativos torna o uso do GARCH multivariado, teoricamente, preferível ao GARCH univariado, pois permite capturar mais informações (LONGIN & SOLNIK, 1995). Mais detalhes sobre aplicações de modelos da família GARCH, veja Bauwens *et al.* (2012), Santos *et al.* (2013) e Gouriéoux (1997).

Na prática, a opção por um modelo multivariado ou univariado não é trivial (CHIB *et al.* 2006 & KUESTER, 2006). Um fato a ser levado em conta se refere ao número de eventos em consideração. Modelos univariado são apropriados quando se considera um único evento ou quando vários eventos podem ser agrupados em um único evento (CAPORIN e MCALEER, 2010). Os modelos multivariados são apropriados quando interações, ou correlações e covariâncias entre os vários eventos são necessários para aumentar o sinal ou informação em relação ao ruído ou choques aleatórios (CAPORIN & MCALEER, 2010). Os modelos multivariados, depois da introdução dos modelos VECM e BEKK por Engle e Kroner (1995), atraíram bastante a atenção dos pesquisadores, entretanto, eles não representam uma solução se o interesse principal for avaliar e medir risco, em vez de

selecionar e gerenciar um determinado portfólio.

Embora modelos de correlação dinâmica condicional sejam importantes para alocação e gestão de portfólio, eles não são úteis para avaliação e medida de risco, onde a variância condicional tem importante papel (CAPORIN & MCALEER, 2008). Os modelos univariados, segundo Burns (2002), são mais simples e muitas vezes exigem menos parâmetros para se expressar.

2.3.2.2. Modelo MGARCH

Como exposto por Silvennoinen e Teräsvirta (2008), o processo de estimação dos modelos MGARCH se depara com alguns problemas. Isto ocorre porque, de um lado, este deve ser flexível o suficiente para ser capaz de representar a dinâmica das variâncias e covariâncias condicionais, e por outro lado, como o número de parâmetros em geral aumenta rapidamente com a dimensão do modelo, a especificação deve ser parcimoniosa o suficiente para permitir que tanto a estimação como a interpretação dos parâmetros do modelo sejam relativamente fáceis.

No entanto, apesar da parcimônia frequentemente significar simplificação, modelos com menor número de parâmetros podem às vezes não ser capazes de capturar dinâmicas relevantes da estrutura de covariância, o que caracteriza a existência de um *trade-off* entre a generalidade e a parcimônia. Segundo Silvennoinen e Teräsvirta (2008), outro aspecto que deve ser levado em consideração na especificação do modelo é o fato de que por definição, as matrizes de covariância precisam ser positivas. Assim sendo, ressalta-se que atender essas necessidades em conjunto têm sido o grande desafio no desenvolvimento de modelos GARCH multivariados.

O primeiro modelo GARCH generalizado incorporando as matrizes de covariâncias, chamado VARCH, foi desenvolvido por Bollerslev *et al.* (1988), e a partir deste, pesquisadores buscaram formular modelos mais parcimoniosos e de fácil interpretação. De acordo com Silvennoine e Teräsvirta (2008), o modelo MGARCH genérico pode ser expresso pela equação (2.1) em que: $\{r_t\}$ é o vetor de um processo estocástico com dimensão $N \times 1$ tal

que $E(r_t) = 0$ e \mathfrak{I}_{t-1} representam o conjunto de informações gerado pelas séries até $t - 1$. Neste caso, assume-se que r_t seja condicionalmente heterocedástico.

$$r_t = H_t^{1/2} \eta_t \quad (2.1)$$

Dado o conjunto de informação \mathfrak{I}_{t-1} , em que, $N \times N$, $H_t = [h_{ijt}]$, é a matriz de covariância condicional de r_t e, considerando η_t como um vetor dos erros do tipo independente e identicamente distribuído, tal que $E(\eta_t \eta_t^T) = I$, é definido pelo arcabouço do modelo GARCH multivariado padrão, no qual não existe nenhuma estrutura de dependência linear em r_t (SILVENNOINEN & TERÄSVIRTA, 2008).

2.3.2.3. Modelo VECH

Em aplicações na área de finanças, r_t é o vetor do logaritmo dos retornos de N mercados. A partir desta estrutura várias formulações paramétricas geram vários tipos de modelos, um grupo, no qual a matriz de covariâncias H_t é modelada diretamente, inclui o modelo VECH de Bollerslev (1986) e VECH diagonal de Bollerslev *et al.* (1988), e o modelo BEKK de Engle e Kroner (1995). O modelo VECH, formulado por Bollerslev *et al.* (1988) é visto como uma generalização direta do modelo GARCH univariado e pode ser expresso como:

$$vech(H_t) = c + \sum_{j=1}^q A_j vech(r_{t-j} r_{t-j}^T) + \sum_{j=1}^p B_j vech(H_{t-j}) \quad (2.2)$$

Em que $vech(\cdot)$ é um operador que empilha as colunas da parte triangular inferior da matriz quadrada e simétrica de ordem $(N \times N)$, em um vetor $(N(N+1)/2) \times 1$, c é um vetor das constantes de dimensão $(N(N+1)/2) \times 1$ e A_j e B_j são matrizes dos parâmetros do modelo com dimensão $(N(N+1)/2) \times (N(N+1)/2)$ e N é a dimensão do modelo (número de séries envolvidas).

A generalidade do modelo VECH é uma vantagem no sentido que dá maior flexibilidade ao modelo, mas também traz algumas desvantagens. Uma delas advém da necessidade da matriz H_t ser positiva definida para que o determinante de H_t seja positivo, além do número de parâmetros, que cresce muito rapidamente quando N aumenta, tornando a

estimação computacional praticamente impossível (GOURIÉOUX, 1997; FOMBY & TERREL, 2006). Ao assumir que os erros η_t seguem uma distribuição normal multivariada, a função log-verossimilhança da expressão (2) é estimada conforme a equação (2.3):

$$\sum_{t=1}^T l_t(\theta) = c - \left(\frac{1}{2}\right) \sum_{t=1}^T \ln |H_t| - \left(\frac{1}{2}\right) \sum_{t=1}^T r_t^T H_t^{-1} r_t \quad (2.3)$$

Neste caso, o vetor de parâmetro θ tem que ser estimado de forma iterativa. Nesse processo, a matriz H_t tem de ser invertida em cada iteração, o que demanda grande carga computacional, a qual cresce rapidamente quando o número de observações é grande. Ao mesmo tempo, este problema se exacerba mais ainda na medida que o número de séries envolvidas, N , aumenta. O outro problema relacionado à matriz de covariância H_t , é como garantir que essa seja positivamente definida em cada t .

No caso do modelo de VECH não existe uma solução geral para este problema (SILVENNOINEN & TERÄSVIRTA, 2008). O segundo modelo é o VECH diagonal apresentado por Bollerslev, Engle e Wooldridge (1988). Eles desenvolveram uma versão simplificada do modelo VECH original assumindo que A_j e B_j em (2) sejam matrizes diagonais. Neste caso, é possível obter condições para que a matriz H_t seja positiva para todos os t .

Detalhes sobre as condições que H_t deve obedecer podem ser verificadas em Bollerslev Engle & Nelson (1994). A estimação do modelo VECH diagonal é muito mais fácil que a estimação do modelo VECH original, isto porque cada equação pode ser estimada separadamente. Porém, se torna demasiado e restritivo uma vez que nenhuma interação é permitida entre as diferentes variâncias condicionais e covariâncias.

2.3.2.4. Modelo BEKK

Uma versão mais restrita do modelo VECH permite a interação das variâncias e covariâncias condicionais, trata-se do modelo BEKK de Engle e Kroner (1995). Este modelo apresenta propriedades atraentes, entre as quais, uma reside no fato de não haver necessidade de imposição de qualquer restrição sobre os parâmetros para garantir que H_t seja positiva, ou seja, as matrizes de covariâncias condicionais são definidas positivamente pela própria

construção do modelo. No caso do modelo VECM, não parece existir uma solução geral para este problema (SILVENNOINEN & TERÄSVIRTA, 2008). O modelo BEKK genérico tem a forma a seguir:

$$H_t = CC^T + \sum_{j=1}^q \sum_{k=1}^K A_{kj}^T r_{t-j} r_{t-j}^T A_{kj} + \sum_{j=1}^q \sum_{k=1}^K B_{kj}^T H_{t-j} B_{kj} \quad (2.4)$$

Em que: A_{kj} , B_{kj} e C são as matrizes de coeficiente de dimensão $N \times N$, e K representa a dimensão do modelo, ou seja, o número de séries envolvidas. A matriz C em especial é uma matriz triangular inferior e seu produto pela sua transposta garante que a matriz H_t seja positiva, e conseqüentemente as variâncias sejam não negativas, com K determinando a generalidade do processo. A vantagem principal desta parametrização reside no fato de não haver necessidade de imposição de restrição sobre os parâmetros para garantir que a matriz de covariância, H_t , seja positiva.

Outra restrição é que as covariâncias do modelo precisam ser estacionárias (SILVENNOINEN & TERÄSVIRTA, 2008). Para $K=1$, o modelo BEKK fornece covariância estacionária somente se os autovalores de $\sum_{i=1}^q A_i \otimes A_i + \sum_{i=1}^p A_i \otimes A_i$, estiverem dentro de do círculo unitário complexo, em que \otimes representa o produto Kronecker de duas matrizes (ENGLE & KRONER, 1995). Mais detalhes acerca do produto Kronecker são encontrados em Tsay (2013) e sobre as condições de estacionariedade do modelo BEKK genérico, $K > 1$, são encontradas em Francq e Zakoian (2010). Para $p=1$, $q=1$ e $K=1$, o modelo BEKK pode ser representado pelas equações (2.5) e (2.6) a seguir.

$$r_t = \alpha + \beta r_{t-1} + \varepsilon_t \quad (2.5)$$

A equação (4.5) representa a equação dos retornos em que $\varepsilon_t | \mathfrak{F}_{t-1} \parallel N(0, H_t)$. Nesta, o vetor r_t representa as séries de retornos em t , α representa o vetor dos interceptos, β é a matriz dos coeficientes em t , e ε_t é o vetor que representa o vetor dos choques ou inovações de cada mercado ou ativo no tempo t . Já a equação da matriz de covariância condicional pode ser representada pela equação (4.6).

$$H_t = C^T C + A^T \varepsilon_{t-1} \varepsilon_{t-1}^T A + B^T H_{t-1} B \quad (2.6)$$

Nesta, para $N = 2$, H_t é uma matriz 2×2 da variância e covariância condicional em t , e C é uma matriz 2×2 triangular inferior contendo 3 parâmetros. A , é a matriz dos coeficientes, 2×2 , que medem a extensão em que os choques ou inovações no mercado 1 no passado, afetam a variância condicional do mercado 2 no presente. Ela permite capturar o efeito ARCH entre os mercados. B , é uma matriz 2×2 dos coeficientes que medem a extensão em que a variância do mercado 1 no passado afetam a variância condicional do mercado 2 no presente. Ela permite capturar o efeito GARCH, ou grau de persistência da variância e da covariância entre os dois mercados. O sistema (2.5) e (2.6) pode também ser representado como o sistema (2.7) e (2.8).

Este modelo é chamado, na literatura especializada, de Modelo BEKK triangular inferior. Sua parametrização foi apresentada por Engle e Kroner (1995) e tem sido utilizado pela literatura especializada para análise da relação entre mercados por: (a) ser flexível o suficiente para ser capaz de representar a dinâmica das variâncias e covariâncias condicionais; (b) atender às restrições matemáticas citadas no início desta seção; (c) ser capaz de capturar os principais fatos estilizados com pouco número de parâmetros; sem contar que os resultados são relativamente de fácil interpretação.

$$\begin{bmatrix} r_{1,t} \\ r_{2,t} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \beta_{11} & \beta_{12} \\ \beta_{21} & \beta_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_{1,t-1} \\ r_{2,t-1} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \varepsilon_{1,t} \\ \varepsilon_{2,t} \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

$$\begin{bmatrix} h_{11,t} & h_{12,t} \\ h_{21,t} & h_{22,t} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_{11,t} & \\ & c_{22,t} \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} c_{11,t} & \\ c_{21,t} & c_{22,t} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix}^T + \begin{bmatrix} \varepsilon_{1,t-1}^2 & \varepsilon_{1,t-1}\varepsilon_{2,t-1} \\ \varepsilon_{2,t-1}\varepsilon_{1,t-1} & \varepsilon_{2,t-1}^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} \\ b_{21} & b_{22} \end{bmatrix}^T + \begin{bmatrix} h_{11,t-1} & h_{12,t-1} \\ h_{21,t-1} & h_{22,t-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} \\ b_{21} & b_{22} \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

Em que, $h_{11,t}$ é a variância do mercado 1 em t , $h_{22,t}$ é a variância do mercado 2 em t , $h_{21,t}$ e $h_{12,t}$ é a covariância entre as duas séries em t , ($h_{21,t} = h_{12,t}$). Os elementos da diagonal secundária de A , $A(a_{ij})(i \neq j)$, medem como os choques sobre o mercado i no passado afetam a volatilidade do mercado j no presente.

Os elementos da diagonal de B , $B(b_{ij})(i \neq j)$, medem como as mudanças na volatilidade do mercado i no passado afetam a volatilidade do mercado j no presente. Neste caso, a covariância corrente é afetada tanto pelos choques dos dois mercados quanto por suas volatilidades no passado. A interpretação do modelo quando é simplificada conforme expresso no sistema de equações (2.9).

$$\begin{aligned}
 h_{11,t} &= c_{11}^2 + a_{11}^2 \varepsilon_{1,t-1}^2 + 2a_{11}a_{21}\varepsilon_{1,t-1}\varepsilon_{2,t-1} + a_{21}^2 \varepsilon_{2,t-1}^2 + b_{11}^2 h_{11,t-1} + 2b_{21}b_{11}h_{12,t-1} + b_{21}^2 h_{22,t-1} \\
 h_{22,t} &= c_{21}^2 + c_{22}^2 + a_{12}^2 \varepsilon_{1,t-1}^2 + 2a_{12}a_{22}\varepsilon_{1,t-1}\varepsilon_{2,t-1} + a_{22}^2 \varepsilon_{2,t-1}^2 + b_{12}^2 h_{11,t-1} + 2b_{12}b_{22}h_{12,t-1} + b_{22}^2 h_{22,t-1} \\
 h_{12,t} &= c_{11}c_{21} + a_{11}a_{12}\varepsilon_{1,t-1}^2 + (a_{11}a_{22} + a_{12}a_{21})\varepsilon_{1,t-1}\varepsilon_{2,t-1} + a_{21}a_{22}\varepsilon_{2,t-1}^2 + b_{11}b_{21}h_{11,t-1} + (b_{11}b_{22} + b_{12}b_{21})h_{12,t-1}\varepsilon_{2,t-1} + b_{12}b_{22}h_{22,t-1} \\
 h_{12,t} &= h_{21,t}
 \end{aligned} \tag{2.9}$$

No sistema de equação (2.9), $h_{11,t}$ e $h_{22,t}$ representam respectivamente as variâncias condicionais das séries do mercado 1 e 2, enquanto $h_{12,t}$ representa a covariância condicional entre as séries de retornos. A significância de qualquer um ou de ambos os elementos b_{21} e a_{21} sugerem que volatilidade corrente do mercado 1, $h_{11,t}$, é afetada por mudanças na volatilidade do mercado 2 no período anterior, $h_{22,t-1}$, no valor de $b_{21}^2 h_{22,t-1}$, ou é afetado por choques sobre o mercado 2, $\varepsilon_{2,t-1}$, no valor de $a_{21}^2 \varepsilon_{2,t-1}^2$ ou é afetado por ambos no valor de $b_{21}^2 h_{22,t-1} + a_{21}^2 \varepsilon_{2,t-1}^2$.

Similarmente, a significância de qualquer um ou de ambos os elementos, b_{12} e a_{12} , sugere que volatilidade corrente do mercado 2, $h_{22,t}$, é afetada por mudanças na volatilidade do mercado 1 no período anterior, $h_{11,t-1}$, no valor de $b_{12}^2 h_{11,t-1}$, ou é afetado por choques sobre o mercado 1, $\varepsilon_{1,t-1}$, no valor de $a_{12}^2 \varepsilon_{1,t-1}^2$, ou é afetado por ambos, no valor de $b_{12}^2 h_{11,t-1} + a_{12}^2 \varepsilon_{1,t-1}^2$. A covariância $h_{12,t}$ ($h_{21,t}$), como mostra a equação (2.9), é afetada pelos erros $\varepsilon_{1,t-1}^2$ e $\varepsilon_{2,t-1}^2$ e variâncias $h_{11,t-1}$ e $h_{22,t-1}$. O modelo é naturalmente simétrico.

Para investigar a existência de transmissão de volatilidade entre, por exemplo, mercado 1 e mercado 2, as seguintes hipóteses conjuntas devem ser testadas: $H_0 : a_{12} = 0 \cap b_{12} = 0$ contra a hipótese alternativa $H_1 : a_{12} \neq 0 \cap b_{12} \neq 0$. Já para investigar se existe transmissão de volatilidade entre mercado 2 e mercado 1, as seguintes hipóteses conjuntas devem ser

testadas: $H_0 : a_{21} = 0 \cap b_{21} = 0$ contra a hipótese alternativa $H_1 : a_{21} \neq 0 \cap b_{21} \neq 0$. Para testar essas hipóteses em conjunto, Hafner e Herwartz (2004) sugerem o teste Wald.

Ao observar o sistema de equações (2.9), pode se verificar que, como os termos do choque no passado são elevados ao quadrado ($\varepsilon_{1,t-1}^2$ e $\varepsilon_{2,t-1}^2$) o efeito sobre a volatilidade corrente será sempre simétrico, independente que os choques $\varepsilon_{1,t-1}$ e $\varepsilon_{2,t-1}$ sejam positivos ou negativos. No entanto, deve-se observar que a volatilidade responde assimetricamente às inovações positivas e negativas (BLACK, 1976).

2.3.2.5. Limitações dos modelos

Os modelos MGARCH tem duas limitações principais. Em primeiro lugar, devido à necessidade de estimar muitos parâmetros, a sua aplicação tem sido restrita à sistemas envolvendo poucas séries. Em segundo lugar, os parâmetros estão vinculados à garantia de estacionariedade da covariância e garantia de que a matriz das covariâncias condicionais seja definida e positiva.

Conseqüentemente, muitos modelos MGARCH populares implementados para representar a evolução dinâmica de volatilidades, covariâncias e correlações de sistemas são extremamente simplificados para que estimação dos parâmetros possa ser viável e possa garantir a estacionariedade e positividade da covariância. Se estas restrições não forem satisfeitas, as variâncias, covariâncias e correlações estimadas podem ser tendenciosas (MCALEER, 2005; BOUSSAMA *et al.*, 2011; ALMEIDA *et al.*, 2015). Em particular, à medida que o número de ativos no modelo cresce, o número de parâmetros a ser estimados cresce numa proporção tal que a carga computacional exigida inviabiliza o processo de estimação (BROOKS & PERSAND, 2000; CAPORIN *et al.*, 2016).

Entre os modelos GARCH multivariados mais populares, encontramos o modelo CCC-GARCH (*Constant Conditional Correlations model*) de Bollerslev (1990), o VECH-GARCH de Bollerslev, *et al.* (1988), o BEKK-GARCH de Engle e Kroner (1995), o modelo de o GDC-GARCH (*General Dynamic Covariance*) de Kroner (1998), o DCC-GARCH (*Dynamic Conditional Correlations*) de Engle (2002b) e de Tse e Tsui (2002).

É grande a quantidade de modelos multivariados desenvolvidos a partir dos modelos clássicos aqui citados. Uma revisão completa acerca dos diversos MGARCH modelos multivariados e suas aplicações pode ser encontrado em Bauwens, *et al.* (2006), Bollerslev (2008), Silvennoinen e Teräsvirta (2009), Francq e Zakoïan (2010), Bauwens, *et al.* (2012), Tsay (2014).

Uma bem sucedida classe de modelo alternativa à classe de modelos ARCH, chamada de Volatilidade Estocástica (SV, *stochastic volatility*), foi introduzida por Taylor (1982), Hull e White (1987). Os modelos SV são atrativos porque consegue capturar os fatos estilizados mais importantes, se aproximam dos modelos financeiros que descrevem comportamento dos preços e têm tido sucesso em aplicações tais como precificação de opções, alocação de portfólio, e em modelos de *Value at Risk* (SHEPHARD & ANDERSEN, 2008).

Teoricamente, os modelos SV são mais atrativos que os modelos ARCH, no entanto eles têm desvantagem em termos de estimação, pois suas funções de verossimilhança exata são difíceis de estimar. Eles acabam sendo menos populares que os modelos da família ARCH devido à sua complexidade e dificuldade de estimação (ANDERSEN & BENZONI, 2009). Uma comparação entre modelos SV e modelos ARCH pode ser encontrado, por exemplo, em Kim *et al.* (1998) e em Carneiro (2004).

3. SETOR SUCROENÉRGÉTICO BRASILEIRO

O setor energético é constituído por combustíveis renováveis e não renováveis, sendo primordial para o ótimo funcionamento das atividades de uma cidade, independente de qual seja essa atividade. Sem energia, uma cidade não funciona, ela está presente no dia a dia de todas as atividades que se desenvolvem em uma cidade; na manutenção e conforto dos lares; na sustentação de um leque diverso de atividades socioeconômicas e cadeias produtivas; no abastecimento, manutenção e operação de uma quantidade inumerável de equipamentos, maquinários e veículos de transportes de cargas e pessoas.

Portanto, um dos grandes desafios para as nações no atual século é a segurança energética, com foco em oferecer energia limpa, e com recursos renováveis para as atividades econômicas. É notório a existência de uma corrida internacional na busca de energias renováveis, sustentáveis e que venham suprir o crescimento da demanda, diminuindo gradativamente a dependência do petróleo. Sabe-se que o petróleo é uma fonte de energia esgotável, que agride de maneira severa o meio ambiente, mas que por outro lado é extremamente viável economicamente, sendo a principal fonte da matriz energética mundial.

Segundo o Observatório do Clima (2015) o Brasil de 1990 a 2014 aumentou suas emissões de gases de efeito estufa em 7%. No ano de 2004 o País emitiu 2,9 bilhões de toneladas e em 2012, 1,48 bilhão de toneladas. Nas últimas décadas, o desenvolvimento econômico e o avanço da taxa de crescimento populacional brasileira proporcionaram aumento das quantidades de bens e serviços, e intensificou o consumo de energia em diversas formas da matriz energética nacional. Segundo o MCT (2010) a mudança no uso da terra e de florestas corresponde a 75% do total das emissões de CO₂ do Brasil, a matriz energética nacional corresponde a 22%.

Entre as principais fontes poluidoras tem-se destaque cinco grandes setores: mudança no uso da terra (desmatamento, queima de resíduos florestais e calagem), agropecuária, energia, processos industriais e resíduos, nessa ordem em grau de emissões. O agronegócio soma participação de cerca de 60% dos gases poluentes liberados na atmosfera (SEEG, 2015).

O Brasil é o maior produtor mundial de cana-de-açúcar com 39% de participação, na produção de açúcar e o maior produtor mundial com 21% do mercado, sendo o maior exportador com 45% de participação nas exportações totais. Na produção de etanol apresenta-se como segundo maior com 27% (UNICA, 2016c; USDA, 2015; RFA, 2015). Foi o pioneiro a implantar a cana-de-açúcar como insumo para produção de um combustível renovável em larga escala. Essa expansão do mercado mundial de açúcar e etanol tem estimulado o aumento do investimento no setor em todo o Brasil (CONAB, 2017).

De acordo com CONAB (2017), em 2015 o setor sucroenergético foi responsável por um PIB de US\$ 43,3 bilhões, cerca de 2% do PIB nacional, quando se considera dos sistemas produtivos derivados do sistema agroindustrial da cana a geração de riqueza fica na ordem de US\$ 107,7 bilhões, com participação na bioeletricidade, leveduras, bioplásticos, biobutanol, diesel de cana, etanol celulósico, créditos de carbono.

3.1. CARACTERIZAÇÃO DA CADEIA PRODUTIVA SUCROENERGÉTICA

A Figura 3.1 apresenta a estrutura lógica de funcionamento da cadeia produtiva sucroenergética, essa cadeia apresenta diversas oportunidades de negócios, como: produção da cana-de-açúcar, produtos derivados serviços de pesquisa, transporte, capacitação, comercialização, exportação, serviços portuários e outros.

A parte central da Figura 3.1 representa a produção agrícola da cana-de-açúcar e as etapas para produção dos dois principais produtos, açúcar e etanol e de outros subprodutos; à montante da produção agrícola tem-se os fornecedores de matérias-primas, maquinário, equipamentos, tecnologias, embalagens etc. À jusante estão localizadas as atividades de comercialização e distribuição, processamento de álcool e bagaço que serão insumos para outras cadeias produtivas como energia, produtos farmacêuticos, alimentos.

No setor produtivo principal (parte central) tem predominantemente duas divisões empresariais. A partir da moagem os elos laterais estão direcionados para produção de açúcar e álcool, e composto por empresas de médio e grande portes, com maior poder de capital financeiro, melhor nível tecnológico; no elo central, concentra-se a produção em pequena escala, como melaço, rapadura e aguardente, as empresas são em grande maioria micro e pequenas.

No setor de insumos (antes das fazendas) no ano de 2017 a indústria produtora de defensivos agrícolas faturou no Brasil aproximadamente US\$ 850,6 milhões, e foram comercializados cerca de 3.950 tratores para o setor sucroenergético (UNICA, 2018). As vendas de caminhões de capacidade acima de 40 toneladas, foi impulsionada pelo rápido crescimento do setor, esses veículos fazem o transporte do etanol, e representa cerca de 80% do transporte da cana de açúcar (CONSECANA, 2018). As vendas de carrocerias, reboques e semirreboques foram estimadas segundo a UNICA (2018) em US\$ 235 milhões, a representação ode 12% das vendas totais da linha pesada no Brasil.

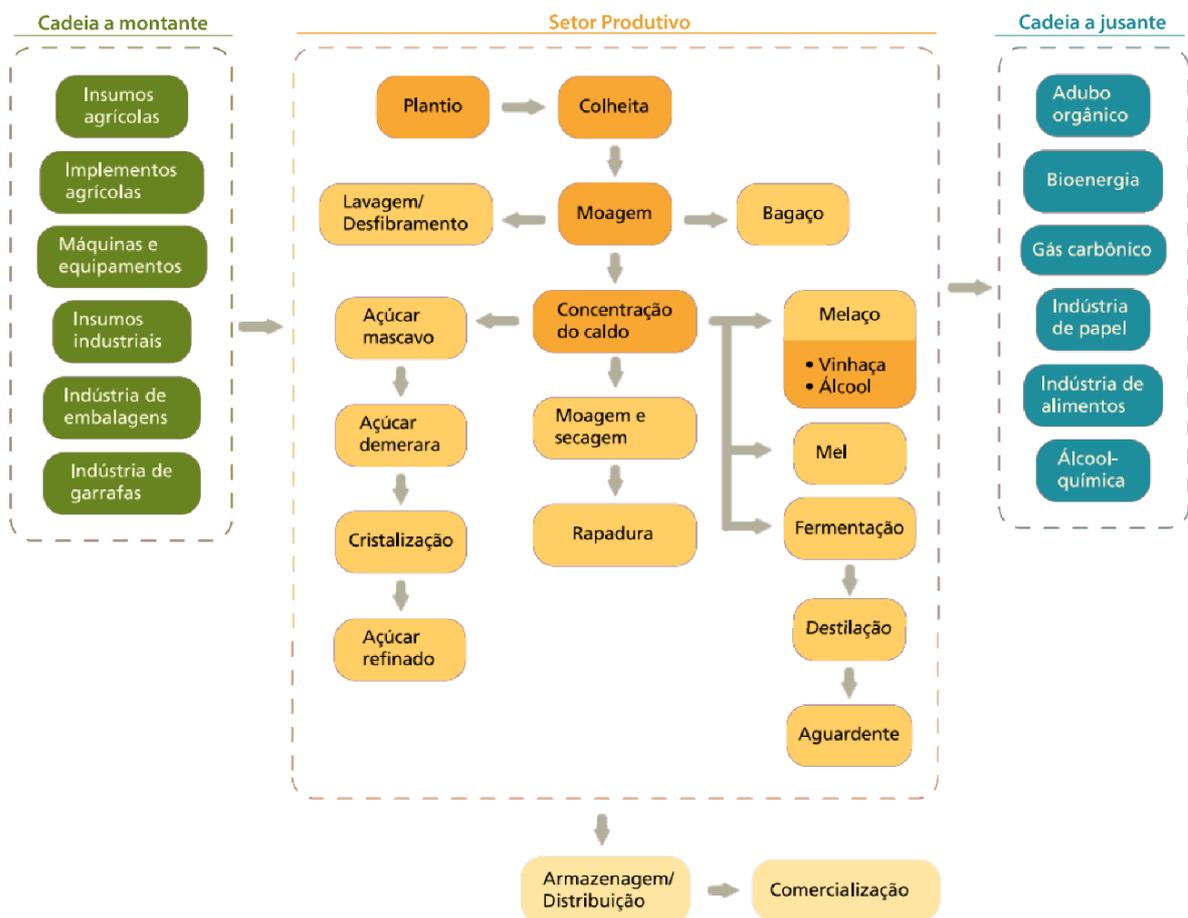


Figura 3.1 - Cadeia produtiva da indústria sucroenergética

Fonte: Adaptado de MAPA/SEBRAE, 2015.

Segundo a União da Indústria da Cana de Açúcar – UNICA (2018) o setor de insumos agrícolas faturou com o setor sucroenergético US\$ 13,2 bilhões em 2017, a cana-de-açúcar respondeu por 16% das vendas de fertilizantes agrícolas no Brasil nesse ano.

Dentro das fazendas a produção nacional de cana-de-açúcar para a safra 2017 foi de 634,8 milhões de toneladas (CONAB, 2017). As região centro-sul do país, que os inclui Estados produtores da região sudeste, sul e centro-oeste, tem maior participação na produção total, cerca de 90,0%. A previsão de para safra 2018 feitas pela CONAB apresentam aumento de 5% na produção relacionado a safra 2017, com produção de 33,87 milhões de toneladas de açúcar e 26,45 bilhões de litros de álcool (CONAB, 2018).

A produção dos derivados da cana de açúcar na região centro-sul acontece entre os meses de abril e novembro, em que se tem menor incidência de chuvas, o que favorece a colheita. Em termos cobertura de área agrícola das usinas o foco é garantir abastecimento contínuo, e para que isso ocorra existe gerenciamento de fatores que influenciam o corte, carregamento e transporte da lavoura até a indústria.

Após as fazendas, a indústria de insumos industriais faturou com o setor sucroenergético US\$ 8,1 bilhões em 2017, isso inclui fornecedores de equipamentos e empresas prestadoras de serviços de montagem. O investimento médio para montagem da parte industrial de uma usina foi estimado em US\$ 89/ton de cana de açúcar, que se traduz em capacidade de moagem, e de uma destilaria, US\$ 75/ton (UNICA, 2018). Segundo CONAB (2017) na região centro-sul a estimativa de gasto com equipamentos ficou em 63% e 37% com serviços.

3.2. PERFIL DA PRODUÇÃO DE CANA-DE-AÇÚCAR E ETANOL NO BRASIL

Na Figura 3.2 é possível visualizar as principais regiões produtoras, nas quais as áreas em vermelho representam a concentração das plantações e das usinas produtoras de açúcar, etanol e bioeletricidade. A produtividade dos canaviais em volume (toneladas de cana por hectares) vem oscilando, porém, no período de 10 anos apresentou um crescimento médio de 3%. Já a área plantada veio aumentando constantemente e com menor oscilação, conforme o Figura 3.3.

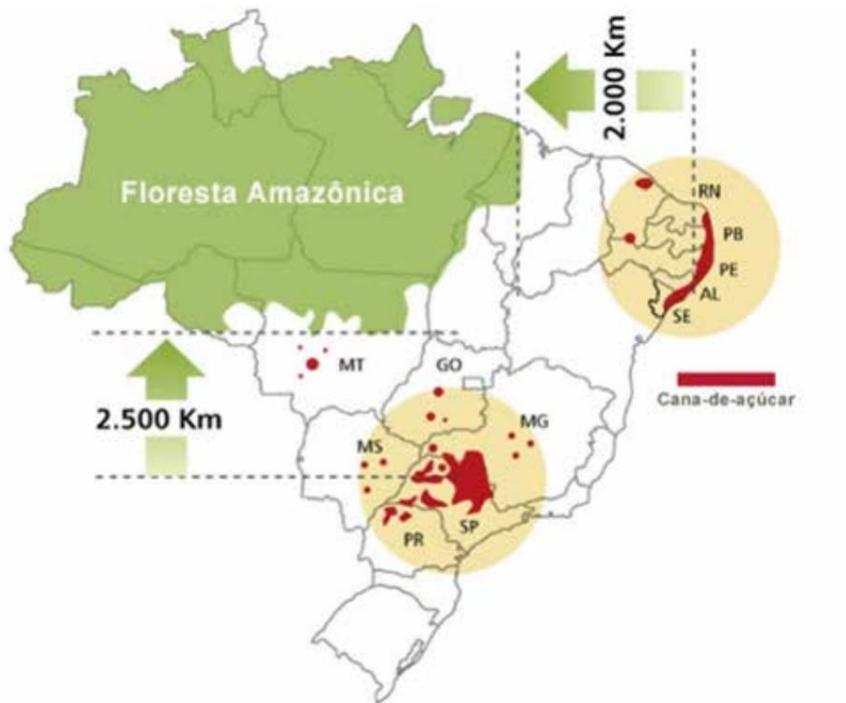


Figura 3.2 - Mapa da produção de cana-de-açúcar no Brasil

Fonte: NIPE-Unicamp e IBGE, 2016.

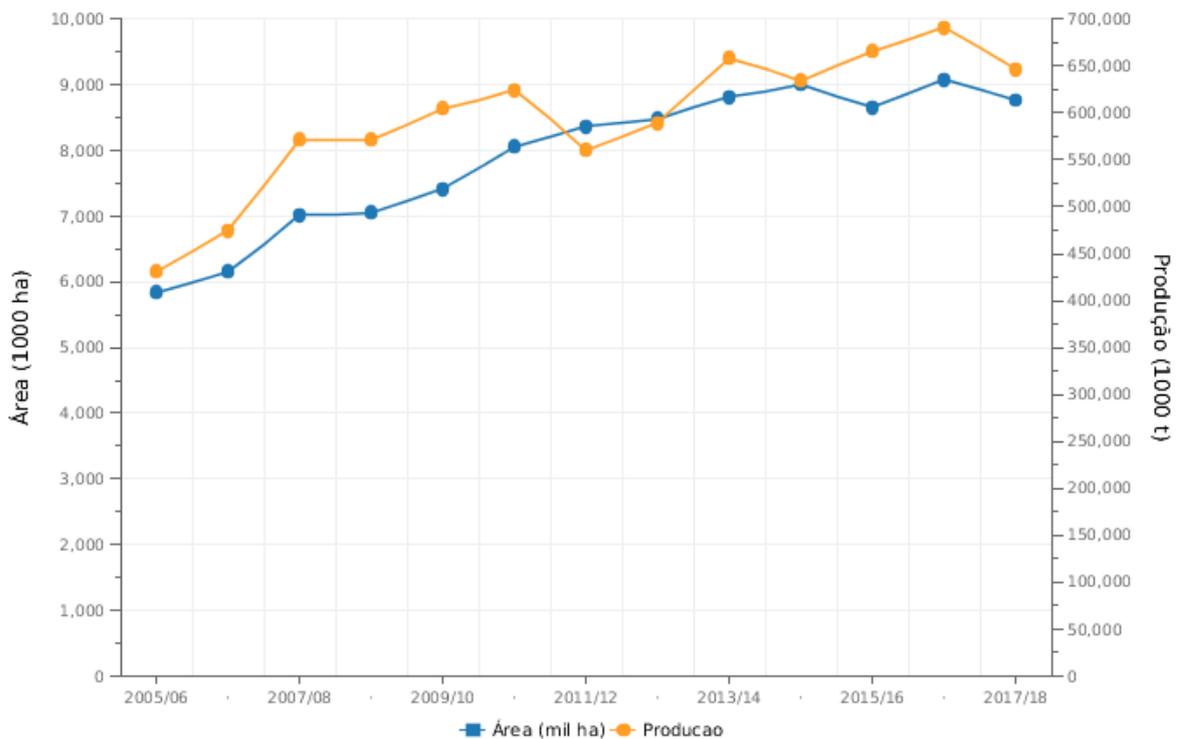


Figura 3.3 - Área plantada e produção de cana-de-açúcar 2005/06 a 2017/18

Fonte: CONAB, 2018.

A produção de cana-de-açúcar acontece em diversos estados brasileiros, conforme visualizado na Figura 3.2. O Estado de São Paulo é o maior produtor, representando na última safra 55,24% da produção e moagem nacional, de acordo com dados da UNICA (2016c). A Tabela 3.1 apresenta a área colhida de cana-de-açúcar nacional comparado ao estado de São Paulo. O Estado de São Paulo é o maior estado com usinas no setor, que conta com 172 usinas, das quais 157 estão ativas, de acordo com o Nova Cana (2018b).

Tabela 3.1 - Área colhida de cana de açúcar em 1.000 ha

	2013	2014	2015	2016	2017	2018
Brasil	8,810.8	9,004.5	8,654.8	9,049.2	8,729.5	8,589.2
São Paulo	5,501.9	5,539.7	5,605.7	5,569.2	5,601.2	5,644.9

Fonte: Elaborado com dados da CONAB, 2019; IEA, 2019.

Em segundo lugar vem o Estado de Goiás, que representou 11,03% da produção e, em terceiro, Minas Gerais com 9,73%. O Figura 3.4 a seguir mostra a participação das regiões na produção e moagem da cana-de-açúcar de 2005/06 a 2017/18.

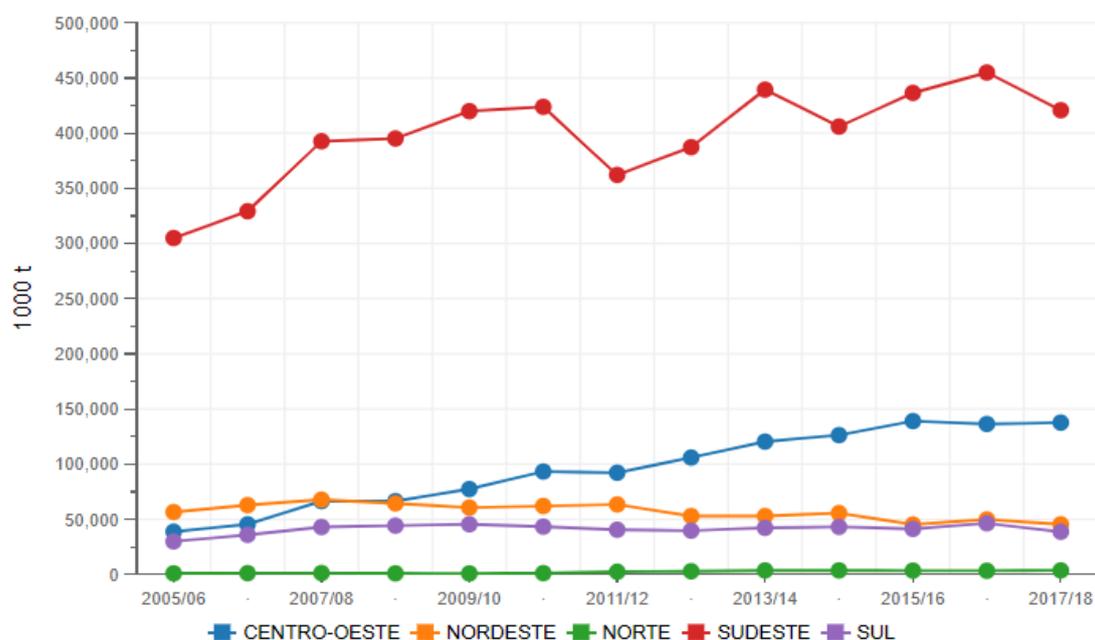


Figura 3.4 - Participação por regiões na produção de cana-de-açúcar

Fonte: CONAB, 2018.

A Região Centro-Sul do Brasil apresenta destaque na produção de açúcar. O rendimento médio da matéria-prima foi de 144,23 quilos de ATR (açúcar total recuperável) por tonelada de cana, com valor médio do ATR na safra de 2017 de US\$ 0,16. A produção de açúcar no Centro-Sul para 2017/18 foi de 36.06 milhões de toneladas e a produção total de etanol de 28,65 bilhões de litros, e a participação no Produto Interno Bruto –PIB nacional de quase 4% considerando a soma das vendas dos bens finais do sistema agroindustrial da cana-de-açúcar (CONAB, 2018). De acordo com a CONAB (2019) a área plantada em 2019 permanece praticamente a mesma do ano de 2018.

A região Centro-Sul apresenta os maiores níveis de esmagamento de cana no Brasil, conforme Tabela 3.2. No estado de São Paulo o rendimento agrícola estimado para 2019/20 é de 68 toneladas métricas por hectare (t/ha), comparado com a colheita anterior que foi de 65.6 t/ha (USDA, 2019), como consequência das favoráveis condições climáticas e meteorológicas no Centro-Sul, e o bom manejo da cultura. A área colhida nacionalmente vem oscilando ao longo do tempo, entretanto, o estado de São Paulo apresenta constância no avanço da cultura.

Tabela 3.2 - Cana esmagada na região Centro-Sul em 1.000 toneladas/mês

	16/17	17/18	18/19
Abril	69.171	41.945	60.170
Mai	72.199	70.264	75.418
Junho	74.221	87.222	88.060
Julho	96.514	98.907	92.880
Agosto	83.731	84.512	77.214
Setembro	80.409	85.933	66.601
Outubro	64.004	62.664	50.607
Novembro	41.453	38.721	36.103
Dezembro	10.349	13.073	15.459
Janeiro	1.771	587	1.120
Fevereiro	2.071	1.308	823
Março	11.243	11.195	8.714
Acumulado	607.136	596.331	573.169

Fonte: Elaborado com dados da USDA, 2019.

Os rendimentos históricos da cana-de-açúcar esmagada no Centro-Sul do Brasil podem ser vistos na Tabela 3.3, a série revela que os rendimentos históricos brasileiros tiveram, nesse período, um ligeiro aumento.

Tabela 3.3 - Rendimentos da cana-de-açúcar esmagada no Centro-Sul (ATR/ton)

	2015/16	2016/17	2018/19
ATR/ton	130,17	133,14	136,45

Fonte: Elaborado com dados da USDA, 2019.

No Brasil a demanda por etanol, principalmente o hidratado, aumentou principalmente pelos preços altos da gasolina, juntamente com as pressões para preços menores do açúcar nas gondolas dos supermercados, e esse cenário exige da que o setor produtivo sucroenergético permaneça em constante melhorias dos processos logísticos produtivos para alcance de melhores índices de produtividades.

3.3. EQUIPAMENTOS DE COLHEITA EM ÁREAS PRODUTIVAS DE CANA-DE-AÇÚCAR

Existem diferentes tipos de máquinas agrícolas que cumprem papéis distintos nas zonas produtoras de cana-de-açúcar, e preciso destacar que pela importância dos produtos derivados da cana-de-açúcar o perfil produtivo dessas áreas é caracterizado por ter elevado nível de tecnificação das fazendas que fazem parte do ecossistema das usinas. O elevado nível de tecnificação em maquinários tem foco específico em redução de custos de mão de obra, diminuição de desperdícios entre as etapas de produção, atendimento de prazos e melhoria de vida do trabalhador rural e conseqüentemente em aumento de produtividade.

As máquinas agrícolas fazem funções de preparo do solo, semeadura, plantio e transplante, aplicação de fertilizantes e adubos, colheita e transporte. Especificamente na fase da colheita o maquinário principal é a colhedora ou ceifadeira, esse equipamento realiza o corte e processamento da matéria-prima colhida colocando-a no transbordo que o carregamento interno no talhão e é transportado por meio de um trator de transbordo até os caminhões semi-reboques que fazem o transporte da matéria-prima até a balança da usina (Figuras 3.5 a 3.10).



Figura 3.5 - Colhedora



Figura 3.6 - Trator transbordo



Figura 3.7 Transbordo



Figura 3.8 - Trator e transbordo



Figura 3.9 - Semi-reboque



Figura 3.10 - Cavalo mecânico + semi reboque

As fazendas que atuam como fornecedoras das usinas e/ou são da propriedade da própria usina consideram diversos indicadores de desempenho para os equipamentos e processos logísticos produtivos, a maioria dos indicadores relaciona-se a tempo e velocidades dos equipamentos das frentes de corte até a usina.

4. MODELO DE TRANSMISSÃO DE VOLATILIDADE AO LONGO DA CADEIA SUCROENERGÉTICA

4.1. ESCOLHA DO MODELO

Nessa pesquisa o modelo GARCH-BEKK triangular inferior assimétrico foi escolhido para análise das relações entre a evolução dos preços dos diferentes elos da cadeia do etanol, produto (usina), distribuidor, e revenda (postos de gasolina). Esse modelo foi escolhido por possuir diversas características superiores aos do GARCH-BEKK triangular convencional, e por ser mais abrangente, pois captura todos os fatos estilizados mencionados na revisão de literatura (seção 2.3.2).

4.2. DADOS E PROCEDIMENTOS

Os dados semanais de preços médios coletados fazem referência ao período de dezembro de 2012 a setembro de 2019, num total de 352 observações. Esses dados são do Centro de Estudo Avançados em Economia Aplicada (CEPEA/ESALQ). Os preços compreendem valores recebidos pelo litro do etanol hidratado nas usinas-EU, distribuidores-ED, revendedores-ER, e preços do litro da gasolina nos postos de gasolina-GR no estado de São Paulo, e podem ser visualizados na Figura 4.1.

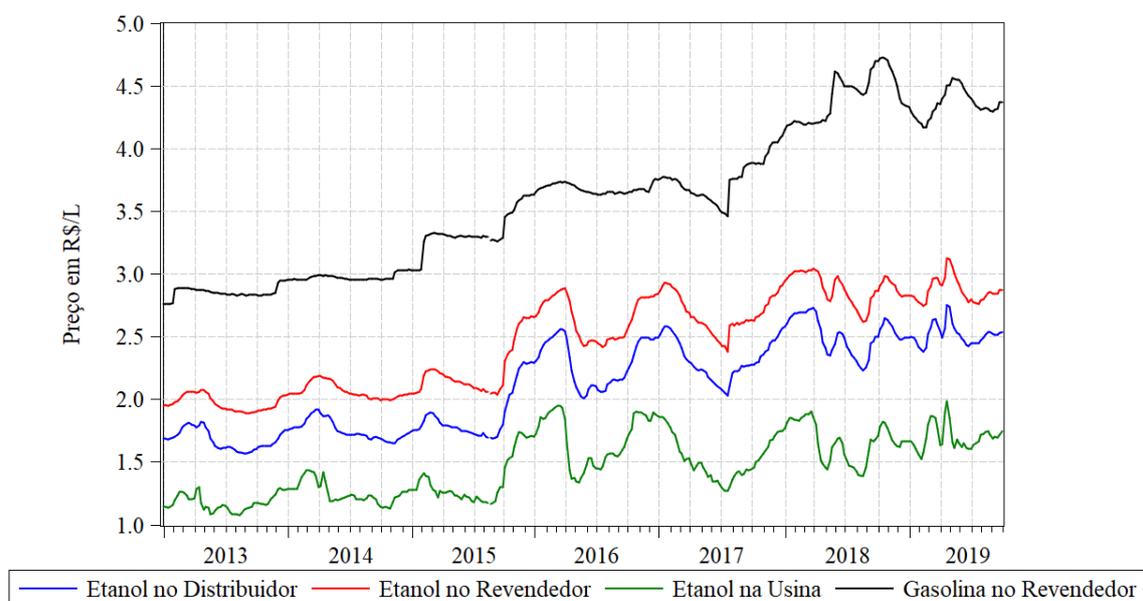


Figura 4.1 - Comportamento das séries de preços semanais do etanol na usina, distribuidor, revenda, e gasolina na revenda.

Fonte: Dados da pesquisa extraído de CEPEA/ESALQ, 2019.

Percebe-se que os preços movimentam de forma similar na maior parte do tempo. Entretanto, é notório que o preço da gasolina demora mais tempo para reduzir do que nas outras séries. Entre 2015 e 2016 foi o período em que os preços dispararam, a oferta de etanol em 2015 apresentou-se mais restrita e a demanda estava aquecida, isso pelo fato de que ocorreram chuvas que prejudicaram a colheita e de certa forma mantiveram os preços do etanol elevados. Os movimentos de altas nos preços do etanol a partir de 2015 também tem relações com mercado exportador que passou a remunerar melhor que o mercado doméstico.

Por outro lado, ocorreram mudanças na composição da gasolina, autorizado no fim de setembro de 2015 que também elevou a demanda por etanol. Individualmente as séries apresentam movimentos ascendentes, mesmo não uniformes, o que pode sugerir exemplo de série não-estacionária.

4.3. ANÁLISE DAS SÉRIES ORIGINAIS

A Tabela 4.1 apresenta as estatísticas descritivas das séries de preços de etanol na usina – EU, etanol no distribuidor – ED, etanol na revenda – ER, e gasolina na revenda - GR, onde pode-se observar que as séries apresentam médias semelhantes com exceção da gasolina na revenda que apresenta uma média superior a todas outras. Todas as médias são inferiores às suas respectivas medianas com exceção do etanol na usina que apresenta comportamento contrário das outras séries, média superior à sua respectiva mediana. No caso do etanol na usina e gasolina na revenda o comportamento da média em relação à mediana sugere no caso uma assimetria positiva, enquanto sugere para outras séries uma assimetria negativa. Isto pode ser confirmado observando a estatística de simetria na sexta linha da tabela.

A assimetria negativa em séries de preços significa que valores extremos negativos ocorrem com maior frequência que os valores extremos positivos, caso das séries de preços do etanol na usina e gasolina na revenda. Já a assimetria positiva é um indicativo de que as distribuições dos preços apresentam os valores extremos positivo com maior frequência que valores extremos negativos.

Quanto à curtose, a Tabela 4.1, apresenta curtose menor que a curtose da distribuição normal para todas as séries. Todas as séries possuem distribuição que pode ser classificada como

leptocúrtica. Todas as séries apresentam curtose menor que 3, entre 1,44 e 1,80. No caso dos preços do etanol na usina e gasolina na revenda têm-se os maiores índices de curtose.

A assimetria e curtose apresentadas pelas distribuições das séries é um indicativo de que elas não se comportam como uma distribuição normal típica. Este fato fica confirmado pelo teste *Jarque-Bera*, na oitava linha da Tabela 4.1, sendo assim, rejeita-se a hipótese nula de que as distribuições da série de preços sejam normais, com nível de significância menor que 0,001.

Tabela 4.1 - Estatísticas descritivas das séries de preços

	Etanol Usina	Etanol Distribuidor	Etanol Revenda	Gasolina Revenda
Média	1,472334	2,123398	2,467028	3,600506
Mediana	1,445400	2,161000	2,541500	3,639500
Máximo	1,984600	2,756000	3,127000	4,725000
Mínimo	1,080300	1,568000	1,890000	2,758000
Desvio Padrão	0,248203	0,358911	0,378186	0,577696
Simetria	0,227642	-0,021088	-0,091028	0,224356
Curtose	1,768584	1,474019	1,444016	1,818600
<i>Jarque-Bera</i>	25,28047	34,17914	35,99540	23,42337
Significância	0,000003	0,000000	0,000000	0,000008
Observações	352	352	352	325

A Tabela 4.2 apresenta os resultados dos testes de raízes unitária realizados sobre todas as séries ao nível. Fez-se os testes ADF (*Augmented Unit Root Dickey-Fullen*) e o teste complementar de KPSS (*Kwiatkowski-Phillips-Schmidt-Shin*). O teste ADF trabalha como hipótese nula a existência de raiz unitária, o teste KPSS⁴ considera a existência de raiz unitária com hipótese alternativa.

Em ambos os casos, os testes ADF não permitiram a rejeição da hipótese nula. E como era coerentemente de se esperar, o teste KPSS rejeitou a hipótese de nula, em todas os casos. Dessa forma fica evidenciado que todas as séries são não estacionárias ao nível, essa é uma característica comum em séries de preços. O teste Ljung-Box, foi realizado para testar correlação serial sobre os resíduos padronizados das séries de preços, e o teste ARCH-LM testou a existência de efeito ARCH.

⁴ O teste KPSS possui hipótese nula inversa ao teste ADF.

Tabela 4.2 - Teste de raiz unitária das séries de preços

Séries	Em nível		Em nível		Decisão
	com constante		com constante e tendência		
	ADF	KPSS	ADF	KPSS	
Etanol Usina	-2,3077	1,4840**	-3,7522	0,2239**	não estacionária
Etanol Distribuidor	-1,8563	1,9548**	-3,9278	0,2273**	não estacionária
Etanol Revenda	-1,5042	2,0081**	-3,0986	0,2928**	não estacionária
Gasolina Revenda	-0,8414	2,1731**	-2,6164	0,2136*	não estacionária

As defasagens utilizadas nos testes ADF foram escolhidas utilizando critério de informação BIC/SBC e os valores críticos utilizados foram -3,4488 (para 1%), e -2,8696 (para 5%) para o modelo com constante; -3,9846 (para 1%) e -3,4227 (para 5%) para o modelo que considera constante e tendência (Mackinnon, 1996). Os valores críticos utilizados para o teste KPSS forma 0,7390 (para 1%) e 0,4630 (para 5%) considerando o modelo somente com constante; 0,2160 (para 1%) e 0,1460 (para 5%) para quando o modelo considera a constante e tendência. (**) rejeita a hipótese nula com nível de significância de 1%; (*) rejeita a hipótese nula com nível de significância de 5%.

Os testes Ljung-Box consideraram até 4 defasagens, até 8 defasagens e até 12 defasagens, enquanto teste ARCH-LM considerou 12 defasagens, conforme sugerido por Tsay (2012). Observando a Tabela 4.3, percebe-se que as hipóteses de não existência de correlação série dos resíduos padronizados, de não existência de serial correlação nos resíduos padronizados ao quadrado e de não existência de efeito ARCH em todas cinco séries foram rejeitadas, isto significa que todas as séries podem ser representadas por modelos GARCH.

Tabela 4.3 - Estatísticas dos resíduos padronizados, resíduos padronizados ao quadrado considerando um modelo ARMA e teste ARCH-LM

Séries	Estatística Ljung-Box						Teste ARCH-LM
	Q(4)	Q(8)	Q(12)	Q ² (4)	Q ² (8)	Q ² (12)	Estatística (12)
Etanol Usina	287,77	298,14	300,76	195,03	210,06	219,13	3422,16
	(0,0000)	(0,0000)	(0,0000)	(0,0000)	(0,0000)	(0,0000)	(0,0000)
Etanol Distribuidor	297,21	304,63	306,20	194,24	204,05	213,27	4131,15
	(0,0000)	(0,0000)	(0,0000)	(0,0000)	(0,0000)	(0,0000)	(0,0000)
Etanol Revenda	284,74	299,75	308,50	200,82	214,26	216,36	583,85
	(0,0000)	(0,0000)	(0,0000)	(0,0000)	(0,0000)	(0,0000)	(0,0000)
Gasolina Revenda	268,22	276,12	317,43	248,09	250,14	250,80	8189,59
	(0,0000)	(0,0000)	(0,0000)	(0,0000)	(0,0000)	(0,0000)	(0,0000)

Nota: Os números que se encontram fora dos parênteses referem-se aos valores estatísticos do teste e os números que se encontram dentro dos parênteses representam as respectivas significâncias estatísticas dos testes.

4.4. ANÁLISES DAS SÉRIES DE RETORNOS

As Figuras 4.2, 4.3, 4.4, e 4.5 apresentam as séries de retornos correspondentes às suas respectivas séries de preços. Para obter as séries de retornos primeiramente as séries originais foram transformadas, utilizando a equação (4.1) a seguir:

$$R_t = 100 \times \ln\left(\frac{P_t}{P_{t-1}}\right) \quad (4.1)$$

onde,

R_t corresponde ao retorno na data t ,

P_t corresponde ao preço na data t e

P_{t-1} corresponde ao preço na data $t - 1$.

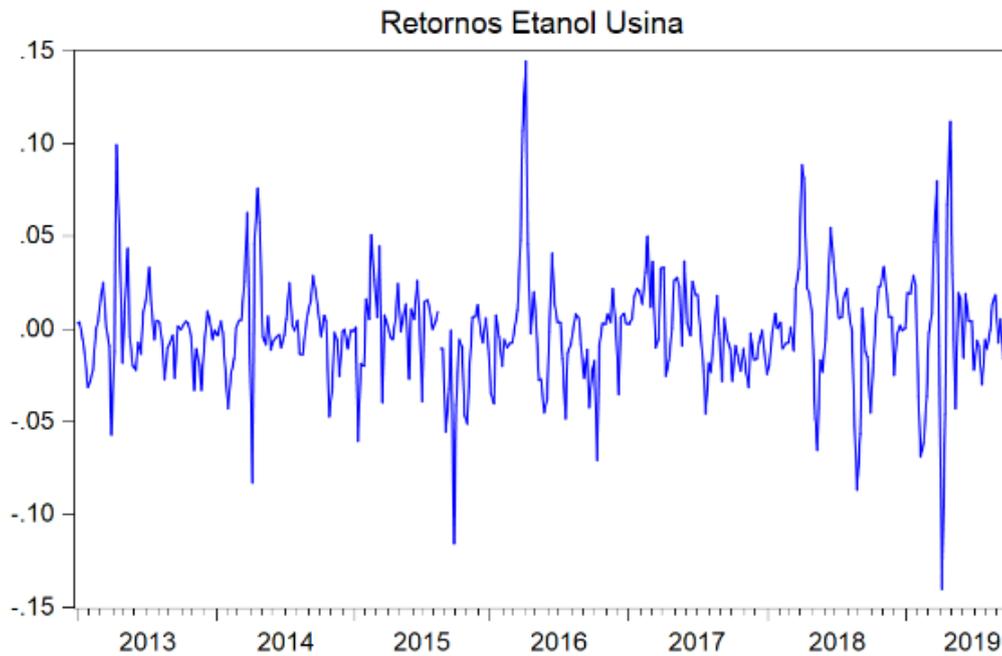


Figura 4.2 - Retornos das séries de preços de etanol na usina

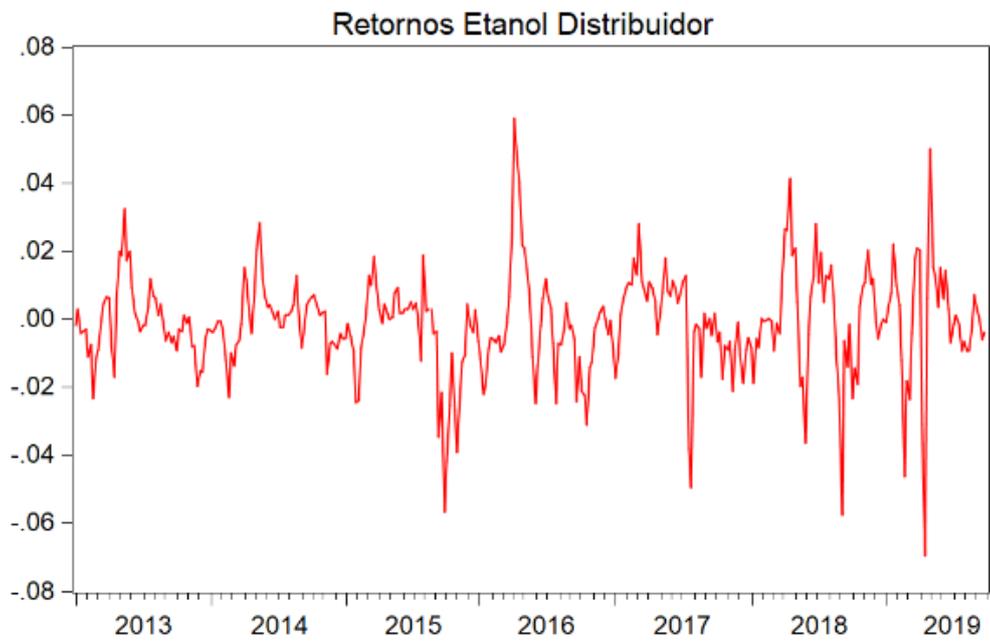


Figura 4.3 - Retornos das séries de preços de etanol no distribuidor

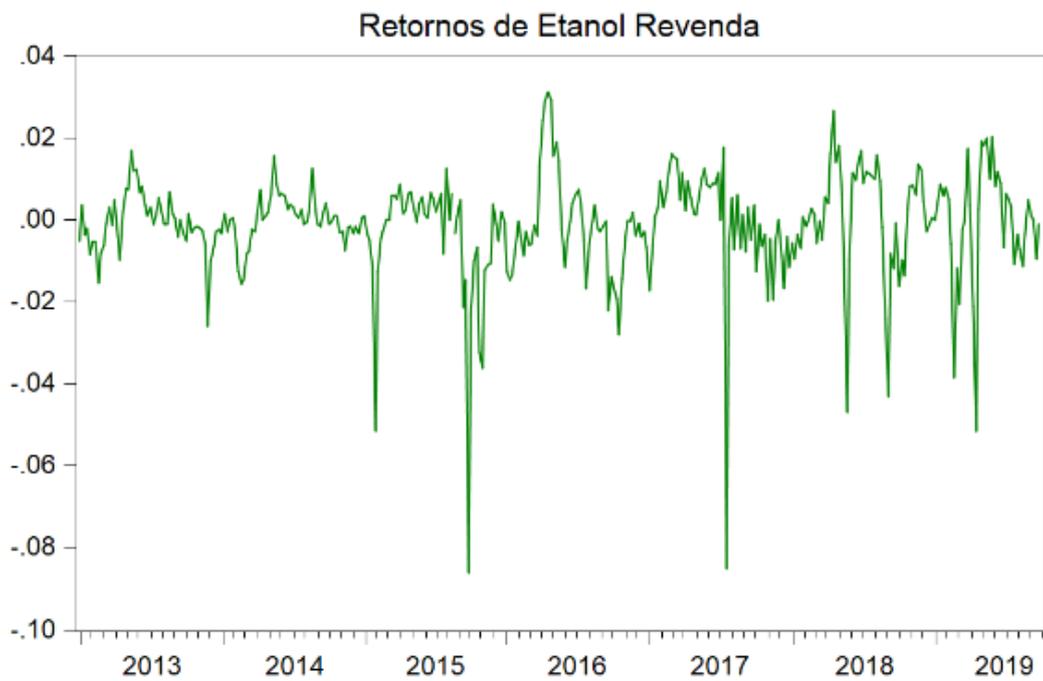


Figura 4.4 - Retornos das séries de preços de revenda

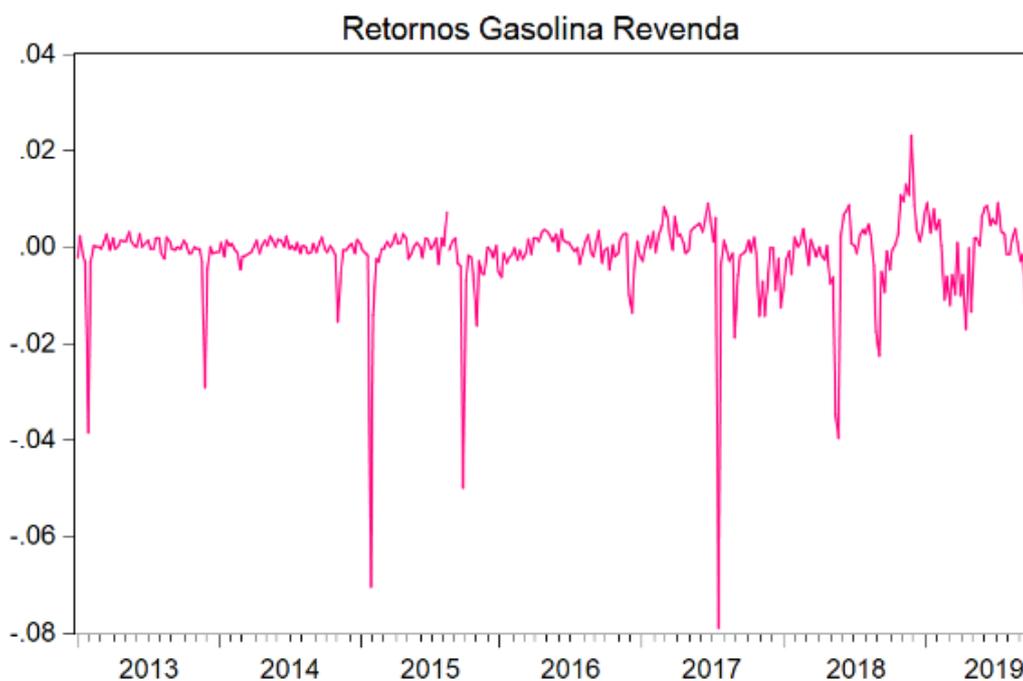


Figura 4.5 - Retornos das séries de preços da gasolina na revenda

Observando cada gráfico pode-se perceber dois padrões comportamentais interessantes. O primeiro padrão observado é o agrupamento de volatilidade, pode se observar nas figuras que os retornos passam por períodos de grande oscilação e alguns momentos de pequenas oscilações, isso é uma característica de efeito ARCH e, desta forma, os retornos são factíveis de serem modelados pela família de modelos GARCH. Como apresentado na Figura 4.1, as séries de preços caminham juntas, tendo um comportamento de co-movimento, e permite conjecturar a viabilidade de construção de modelos GARHC multivariados.

O segundo padrão notório é que os retornos oscilam em torno de zero, e isso sugere que as séries de preços estão agora estacionarizadas pela transformação efetuada. Isto significa, que as séries de retornos devem ser estacionárias, sendo assim, à aplicação da metodologia de Box e Jenkins é apropriada.

A Tabela 4.4 apresenta os resultados dos testes ADF e KPSS que foram aplicados às séries de retornos. A hipótese nula do teste ADF, que as séries possuem uma raiz unitária, é rejeitada, a 1%, para todas as séries. Enquanto a hipótese nula do teste KPSS, a série não possui uma raiz unitária, foi aceita também em todas as séries. Em síntese, o teste KPSS

confirmou o resultado do teste ADF, assim, conclui-se que as séries de retornos são estacionárias, e podem ser modeladas pela metodologia Box-Jenkins.

Tabela 4.4 - Testes de raiz unitária das séries de retorno

Séries	Em nível		Em nível		Decisão
	com constante		com constante e tendência		
	ADF	KPSS	ADF	KPSS	
Etanol Usina	-12,4142	0,0248**	-12,3974	0,0227**	não estacionária
Etanol Distribuidor	-8,6143	0,0361**	-8,6020	0,0316**	não estacionária
Etanol Revenda	-11,0626	0,0391**	-11,0498	0,0315**	não estacionária
Gasolina Revenda	-14,0925	0,0555**	-14,0798	0,0457**	não estacionária

As defasagens utilizadas nos testes ADF foram escolhidas utilizando critério de informação BIC/SBC e os valores críticos utilizados foram -3,4488 (para 1%), e -2,8695 (para 5%) para o modelo com constante; -3,9844 (para 1%) e -3,4227 (para 5%) para o modelo que considera constante e tendência (Mackinnon, 1996). Os valores críticos utilizados para o teste KPSS foram 0,7390 (para 1%) e 0,4630 (para 5%) considerando o modelo somente com constante; 0,2160 (para 1%) e 0,1460 (para 5%) para quando o modelo considera a constante e tendência. (**) rejeita a hipótese nula com nível de significância de 1%; (*) rejeita a hipótese nula com nível de significância de 5%.

4.5. ANÁLISE MULTIVARIADA DOS RETORNOS

Os modelos foram estimados utilizando o algoritmo BHHH (*Berndt, Hall, Hall and Hausman*) ou Simplex, nas primeiras 20 iterações, prosseguindo a partir de então com o algoritmo BFGS (*Broyden, Fletcher, Goldfarb e Shanno*) até a convergência, levando em consideração a distribuição *t-de-student*, GED (*Generalised Error Distribution*) e distribuição normal.

A Tabela 4.5 apresenta os coeficientes estimados dos modelos e suas respectivas significâncias, apresentadas entre parênteses. Essa tabela está organizada em três seções. Na primeira, de cima para baixo, são apresentados os modelos BEKK, e seção está subdividida em: modelos ARCH bivariados, onde encontra-se os coeficientes do efeito ARCH, que são elementos da matriz **A**, e oriundo do sistema de equações (2.1). Nessa mesma seção, vem em seguida os elementos da matriz **B**, que são os coeficientes do efeito GARCH; e por último nessa seção encontram-se os coeficientes da assimetria, elementos da matriz **D** do modelo do sistema de equações (2.9).

A segunda seção da Tabela 4.5 trata dos testes que realizam o diagnóstico dos resíduos dos respectivos modelos: para averiguar a existência de autocorrelação serial dos resíduos

padronizados fez-se o teste Ljung-Box (Estatística-Q); e em seguida fez-se o teste ARCH-LM, que investiga a existência de resquício de efeito ARCH nos resíduos padronizados. A última seção trata-se do teste de Wald que verifica a causalidade da variância e consequentemente a existência de transferência de volatilidade.

Utilizando como critério o logaritmo da função de máxima verossimilhança e diagnóstico dos resíduos, os melhores modelos estimados foram encontrados, em geral, quando se utilizou a GED como distribuição e o algoritmo BHHH e Simplex em conjunto com o algoritmo BFGS.

Todos os modelos apresentaram: (1) resíduo com ausência de autocorrelação serial conforme os resultados do teste Ljung-Box, e tiveram estatísticas com significâncias acima do nível da significância convencional (5%); (2) inexistência de resquícios de efeito ARCH, conforme os resultados do teste ARCH-LM, cujas estatísticas apresentaram significância acima do nível de significância convencional (5%).

Considerando o sistema de equações (2.9), a transferência de volatilidade fica estabelecida de um elo da cadeia i para outro j quando ao menos um dos coeficientes a_{ij} e b_{ij} , ($i \neq j$), que são elementos da matriz **A** e da matriz **B**, é estatisticamente significativa. Se a_{ij} , for significativa, implica que a variância do mercado j é influenciada por choques ocorridos no mercado i no período anterior. Se b_{ij} for estatisticamente significativa, a variância do mercado j é afetado por alterações na variância do mercado i no período anterior.

Analisando especificamente a transmissão de volatilidade por choques de um elo para outro, em pares, com exceção do modelo EU (1) para GR (4), que não apresentou transmissão via choque, para os demais modelos os coeficientes a_{12} (efeito ARCH) e os coeficientes b_{12} (efeito GARCH) também são estatisticamente significantes, ou seja, todos transmitem volatilidade entre si, via choque e via volatilidade.

Tabela 4.5 - Modelos BEKK bivariados considerando os preços do etanol e gasolina

MODELOS		EU (1)	ED (2)	ER (3)	GR (4)	
Coeficientes dos modelos	<i>a</i>	EU (1)	-	-0,069*	-0,1567*	0,02242
			-	(0,004)	(0,0000)	(0,2411)
		ED (2)	-0,3246	-	0,3476*	-1,2714*
			(0,2547)	-	(0,0001)	(0,0000)
		ER (3)	0,7569*	1,3910*	-	0,6923*
			(0,0020)	(0,0000)	-	(0,0000)
		GR (4)	1,7213*	1,7771*	0,1837*	-
			(0,0000)	(0,0000)	(0,0088)	-
	<i>b</i>	EU (1)	-	-0,0556*	0,0726*	-0,0944*
			-	(0,000)	(0,0000)	(0,0000)
		ED (2)	1,0988*	-	1,0065*	0,3295*
			(0,0000)	-	(0,0000)	(0,0000)
	ER (3)	-1,1449*	-0,5313*	-	-0,1703*	
		(0,0000)	(0,0000)	-	(0,0003)	
	GR (4)	-0,6135*	-0,3620*	-0,4290*	-	
		(0,0000)	(0,0000)	(0,0000)	-	
<i>d</i>	EU (1)	-	0,5720*	0,3520*	0,5080*	
		-	(0,0000)	(0,0000)	(0,0000)	
	ED (2)	0,8253*	-	1,6057*	5,4226*	
		(0,0000)	-	(0,0000)	(0,0000)	
	ER (3)	1,8237*	-2,3080*	-	-4,1861*	
		(0,0000)	(0,0000)	-	(0,0000)	
	GR (4)	-2,8412*	-2,6567*	-1,5310*	-	
		(0,0000)	(0,0000)	(0,0000)	-	
Diagnóstico dos resíduos	Estatística-Q(24)	33,164	29,571	41,051	21,932	
		(0,1006)	(0,1993)	(0,106)	(0,5833)	
	ARCH_LM (12)	5,499	3,548	4,734	2,173	
		(0,4816)	(0,7376)	(0,3157)	(0,7039)	
Teste Wald	EU (1)	-	46,7505*	496,7662*	306,7926*	
		-	(0,0000)	(0,0000)	(0,0000)	
	ED (2)	50,6318*	-	6651,4797*	6662,2259*	
		(0,0000)	-	(0,0001)	(0,0000)	
	ER (3)	70,6227*	4287,4837*	-	3526,5500*	
		(0,0000)	(0,0000)	-	(0,0000)	
	GR (4)	5,0468*	259,9543*	183,6811*	-	
		(0,0000)	(0,0000)	(0,0000)	-	

Nota: (EU) Etanol Usina, (ED) Etanol Distribuidor, (ER) Etanol, Revendedor, (GR) Gasolina Revendedor.
 (*) Estatisticamente significativa ao nível de 5%, (**) Estatisticamente significativa ao nível de 10%.

Para transmissão de volatilidade no primeiro modelo (matriz A), destaca-se que as variações, por choques, nos preços do etanol na usina causam volatilidades negativas no distribuidor e na revenda do etanol apresentando os coeficientes, -0,069, -0,1567 respectivamente. O mesmo ocorre quando há variações por choques nos preços no distribuidor para a usina e para a revenda de gasolina, com coeficientes, -0,3246, -1,2714.

Essas transmissões de volatilidades com coeficientes negativos sugerem que existem muito mais volatilidades no início da cadeia (usina e distribuidor) do que ao final da cadeia (revendas de etanol e gasolina), a Figura 4.2 visualmente também corrobora com essa sugestão, quando apresenta clusters de volatilidade mais concentrados na usina e distribuição. As alterações nos custos de produção podem em menor grau causar desequilíbrios para o distribuidor e conseqüentemente para a revenda, e em maior grau a própria conjuntura do mercado que influencia as quantidades produzidas do etanol disponibilizado no mercado nacional.

Em relação a transmissão por volatilidades (matriz B), de um elo para outro, em pares, todos apresentaram significâncias de 0,0000. Portanto, considerando o nível de significância convencional, todos têm transmissão via volatilidade. Em destaque quando os preços do etanol na usina variam, causam transmissões negativas para o distribuidor e para revenda de gasolina (coeficientes -0,0556; -0,0944, respectivamente), interessantemente causa volatilidade positiva na revenda do etanol. As variações nos preços do etanol na revenda causam transmissões negativas em todas as demais séries, assim como a gasolina na revenda.

Quanto a assimetria da transferência de volatilidade, a Tabela 4.5 mostra d_{12} e d_{21} com coeficientes significativos em todos os modelos, indicando que transferem volatilidades com assimetria, o teste de Wald corrobora nessa análise. Em termos de transferência de volatilidade, o etanol na revenda destaca-se como dominante em transferência de volatilidade para os outros por apresentar persistências, de curto prazo.

4.6. CONCLUSÕES DO MODELO DE TRANSMISSÃO DE VOLATILIDADE

Considerando as séries de preços, encontrou-se evidências empíricas de que todos os elos da cadeia transmitem volatilidade entre si, tanto via choque quanto por via volatilidade. As séries apresentam características de co-movimento, e possivelmente são cointegradas. Existe uma persistência de volatilidade, nas revendas, característica comum em elos mais a jusante da cadeia produtiva, em termos práticos, no curto prazo significa dizer que os ajustes de preços por conta das transmissões de volatilidade podem demorar mais tempo para etanol e gasolina na revenda.

Analisando a relação entre as quatro séries estudadas, conclui-se que a transmissão por volatilidade ocorre em todos os modelos e em todas as direções. No entanto a transmissão via efeito ARCH é limitada, isto é, por não ocorrer de EU (1) para GR (4). Em termos de transferência de volatilidade pode se afirmar que esses elos estão estatisticamente integrados. A possibilidade de escolha do consumidor entre etanol hidratado e gasolina, e até a combinação entre esses, resulta na dinâmica de muitos anos do mercado brasileiro. O Brasil possui uma das maiores frotas de carros *flex-fuel* do mundo, e sendo um país continental pode apresentar consideráveis diferenças de perfil de consumo e preços por regiões.

Os resultados apresentados por Salvo e Huse (2013), identificaram heterogeneidade nas preferências dos consumidores brasileiros, associadas as características regionais e demográficas. A implicação principal dessa característica é que mudanças no perfil de consumo regional não são considerados nos modelos de previsão demanda e preços da cadeia do etanol, ou seja, não há sinalização direta para os agentes econômicos, e pode causar maiores transmissões de volatilidade a montante da cadeia produtiva.

Essas evidências sugerem que a cadeia sucroenergética brasileira tem um funcionamento esperado quanto a dinâmica de preços, e esse modelo de transmissão constitui um instrumento eficaz para identificação e gestão de riscos. A existência de transmissão de volatilidade sugere importância no contexto gerencial do acompanhamento constante do comportamento dos preços do etanol, impactos e como interferem no comportamento dos agentes da cadeia produtiva.

5. MODELO DE PROCESSOS LOGÍSTICOS PRODUTIVOS

O desenvolvimento do modelo logístico produtivo foi executado em módulos que compreendem: modelagem dos processos logísticos produtivos da usina, capacidade máxima de produção e sincronização. A seguir são apresentadas as características da usina do estudo de caso dessa pesquisa, e como se deu a construção do modelo.

O fluxo da Figura 5.1 mostra as cinco etapas para construção do modelo de processos logísticos produtivos. A etapa 1 tratou-se da escolha da fazenda, na etapa 2 fez-se o mapeamento do sistema logístico de corte, carregamento e transporte – CCT, a etapa 3 compreende a coleta dos dados, a etapa 4 foi a construção do modelo, e pôr fim a etapa 5 que apresenta as três fases em que a validação do modelo é realizada, e como cada fase discrimina os passos que foram seguidos para alcance dos objetivos. No final da figura se apresenta o fluxograma do modelo de simulação aplicado para obtenção dos resultados, que é parte da etapa 5 e da fase F1.

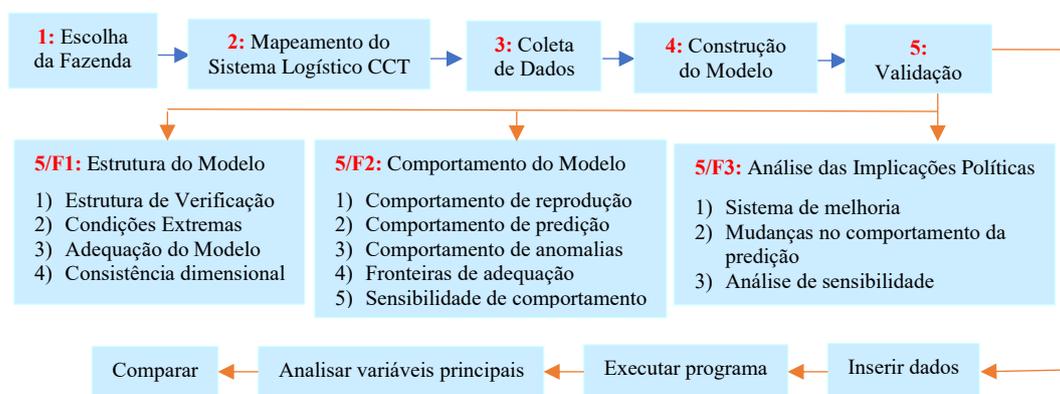


Figura 5.1 - Fluxo de construção do modelo de sincronização

5.1. ESCOLHA DA FAZENDA-INDÚSTRIA PARA ESTUDO DE CASO

A usina selecionada foi fundada em 2008 e faz parte do portfólio de usinas com participação da Petrobrás Biocombustível. Têm 2.601 funcionários e a colheita é 100% mecanizada. A área total da fazenda abrange 1,7 milhão de metros quadrados, com 23 mil metros quadrado de área construída, e layout modular com planejamento para expansão de operações. Possui um centro de operações industriais que comanda e verifica o status em tempo real de todas as operações da indústria (Figura 5.2).



Figura 5.2 - Foto aérea usina sucroenergética

A capacidade de processamento da usina é de 4,5 milhões de toneladas de cana-de-açúcar por ano, e tem condições para produzir 385 mil metros cúbicos de etanol por ano. Por sua dimensão e capacidade de processamento é considerada uma fazenda industrial.

As regiões produtoras dessa usina receberam um trabalho de engenharia, conhecido como sistematização do terreno, no qual subdivide-se a área em talhões e aloca-se os carregadores principais e secundários. Atualmente, busca-se obter talhões planos mantendo linhas de cana com grande comprimento para evitar manobras das máquinas, otimizando operações mecanizadas. Em geral, os talhões de cana estão subdivididos quanto à sua topografia e homogeneidade do solo e apresentam, em média, entre dez e 20 hectares e são divididos em talhões funcionais de acordo com as colhedoras que serão utilizadas.

Para conhecimento do problema foram visitadas três áreas produtivas para mapear os processos de corte, carregamento, transporte até a usina. Essas áreas cultivo localizam-se num raio de 25 km da usina, e em conjunto são responsáveis por fornecer 65% da cana-de-açúcar processada por ano pela usina desse estudo de caso.

5.2. MAPEAMENTO DO SISTEMA LOGÍSTICO CCT (CORTE, CARREGAMENTO E TRANSPORTE)

A primeira etapa da modelagem consistiu em mapear o sistema logístico de colheita/corte, carregamento e transporte da cana-de-açúcar até a usina. Todo esse processo é mecanizado e programado previamente pelo departamento de mecanização agrícola. O objetivo desse mapeamento é definir as variáveis envolvidas no sistema CCT e medir os tempos gastos em cada atividade realizada. Nesse caso não se considera o sistema logístico do plantio, já que existe um período bastante longo entre a execução de ambos os sistemas. É importante ressaltar que o bom planejamento do segundo sistema (CCT) está em função do planejamento do primeiro (Plantio). Isso deve-se que no planejamento da área de plantio entra uma variável importante que é a divisão dessa área em talhões, separados por caminhos por onde circularão os equipamentos previstos tanto para o plantio como para a colheita. Esses talhões dependem da dimensão desses equipamentos e vice-versa.

Outro fator importante no planejamento do sistema CCT é a definição das frentes de corte (FC), já que a quantidade de FC necessários para fazer toda a colheita depende da capacidade de moagem da usina, da distribuição geográfica da área de plantio, tamanho da fazenda, localização da usina etc. Cada frente de corte é trabalhada por uma equipe que opera com um conjunto de equipamentos diferentes adequados para esse tipo de processo. Na modelagem, além de definir o número de frentes de corte que o sistema CCT deve ter, também há que determinar os limites das áreas que cada equipe atenderá, já que as FC trabalham simultaneamente durante todo o período da colheita.

A execução do sistema CCT inicia-se com a colheita e corte mecanizado da cana que é ininterrupta (Figura 5.3). Esta primeira fase se realiza com as colhedoras (fase 1) que trabalham 24 horas por dia. A colhedora colhe a cana, a pica e a despeja em uma unidade de transbordo (fase 2). Esse equipamento é similar a um semirreboque, ele é engatado no trator de transbordo, assim um trator pode arrastar várias unidades de transbordos. Uma vez cheia a carroceria da unidade de transbordo (TB), o trator se dirige ao malhador (área onde os caminhões se estacionam) e se posiciona ao lado do caminhão semirreboque (C-SR) (fase 3). Esta unidade de transbordo tem seu próprio mecanismo que lhe permite levantar a carroceria, ou seja, o operador aciona uns pistões hidráulicos e a carroceria do TB se eleva, transferindo a carga para os caminhões. Depois desse procedimento, o trator retorna o transbordo vazio à frente de corte (fase 9) para receber a cana que está sendo cortada. Por essa atividade que realiza o trator, ele recebe o nome de trator de transbordo (TT).

Quando o C-SR completa a carga, o motorista vai até à usina (fase 4). Ao chegar à usina, o C-SR é pesado (fase 5). Depois o motorista se dirige à área de coleta de amostras onde um operador tira uma amostra por meio de uma sonda de amostragem (fase 6). Logo o motorista estaciona o C-SR ao lado do hilo tombador de cana (HT) onde é operado por meio do engate dos cabos ou correntes do caminhão juntamente com os ganchos do tombador. O guincho do HT eleva a carga da carroceria do C-SR através de um acionamento mecânico despejando-a em uma mesa alimentadora de cana (fase 7). Depois de tudo esse ciclo de operação, o C-SR vazio passa pela balança de novo (fase 8) e retorna à frente de corte (fase 10).

Para que todo esse ciclo de operação do sistema logístico CCT funcione perfeitamente sem parar é necessário a sincronização de todos os processos e atividades desde a primeira fase

do processo até a última fase, como mostra-se na Figura 5.3. O principal desafio dessa pesquisa é a sincronização dos tempos de operação e deslocamento de todos os equipamentos, de forma que a cana cortada chegue à usina no momento certo para que o processo desta não pare, principalmente quando a demanda por etanol se eleva por conta das condições de mercado. Com o intuito de obter um modelo de um problema real se realizou o mapeamento de todos esses processos em uma usina da Região Sudeste do Brasil. Esse mapeamento mostrou que existem duas decisões importantes na gestão do sistema logístico CCT, e que estão relacionadas aos dois ciclos de operação do sistema. A viabilidade e sincronização desses dois ciclos é função do dimensionamento dos equipamentos e da capacidade da usina. O primeiro ciclo de operação refere-se à sincronização colhedora versus C-SR e o segundo ciclo, à sincronização C-SR versus usina.

Com relação ao primeiro caso, observa-se que é essencial o dimensionamento da quantidade e capacidade das unidades de transbordo (TB) e dos tratores de transbordo (TT). Esses dois equipamentos são os que mantem o fluxo de carga contínuo entre a colhedora e o caminhão semirreboque, fazendo com que a colhedora não pare em nenhum momento. No segundo caso, percebe-se que é fundamental o dimensionamento dos C-SR quando a suas quantidades e capacidade. O propósito nesse caso é manter sempre um caminhão ou um semirreboque no malhador ou ponto de transbordo da carga para que não pare o primeiro fluxo, e dê tempo para que o outro veículo que está fazendo a entrega da cana à usina possa fazer todo o segundo ciclo de operação do sistema CCT.

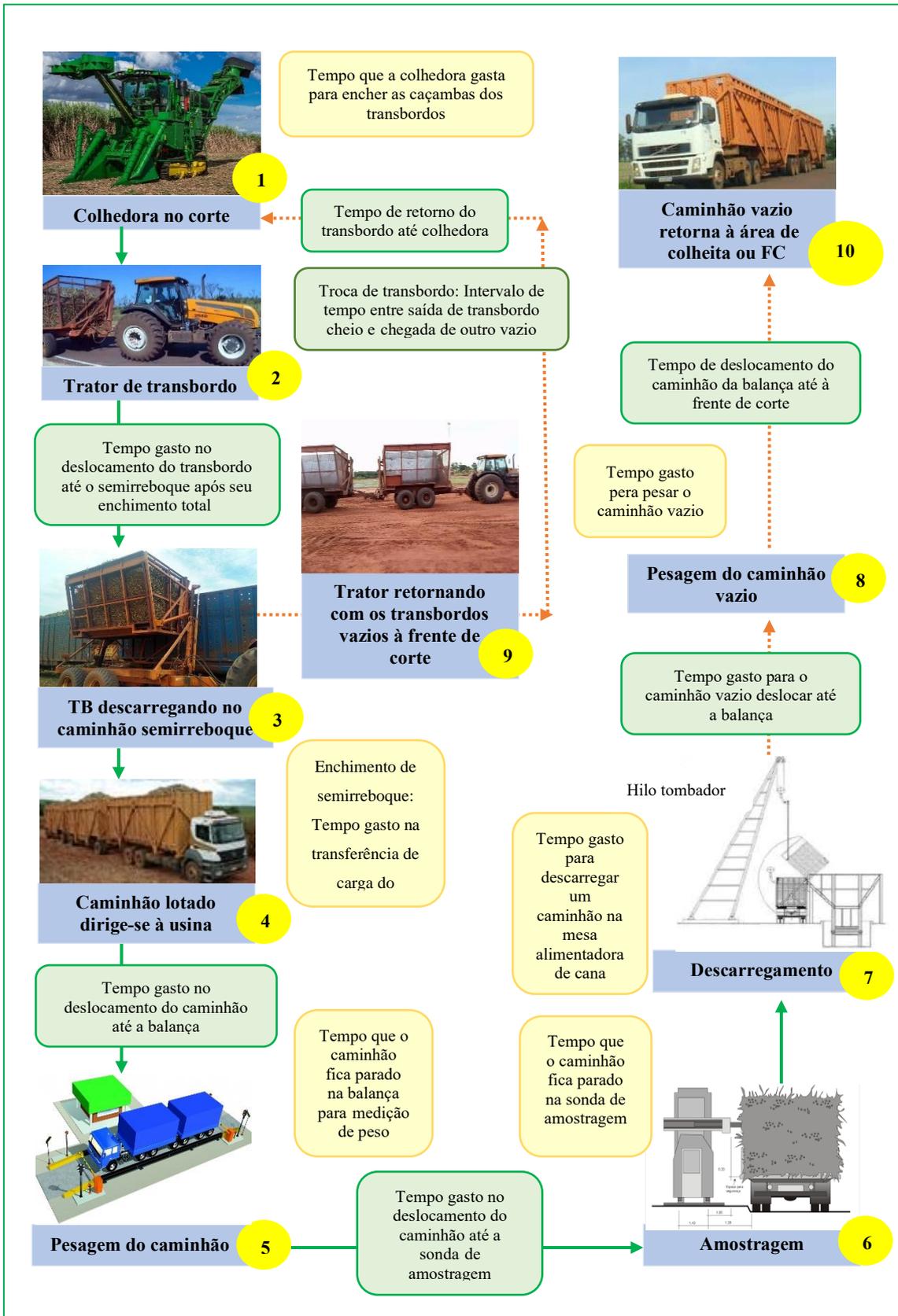


Figura 5.3 - Sistema Logístico CCT

Fonte: Fotos das fases 1 à 4 e 9 e 10 são autoria própria; foto da fase 5 da setcesp.org.br; foto da fase 6 da stab.org.br; foto da fase 7 da Agencia Embrapa de Informações; foto da fase 10 do mundobrasileiro.com.

O planejamento logístico para atender o sistema CCT depende dos objetivos e estratégias que cada empresa sucroenergética adota. Essas estratégias estão em função do preço do produto no mercado, da demanda, da capacidade financeira e de capital da empresa, custos e benefícios, posicionamento no mercado, limitações etc. O dimensionamento da área a ser plantada, assim como o dimensionamento dos equipamentos, quanto a número e quantidade, são decisões que podem ser consideradas tanto estratégica, como tática e operacional.

A rigor, é importante ressaltar que a adoção de qualquer plano logístico necessita ser analisado cuidadosamente procurando sempre atingir a otimização e sincronização dos ciclos de operação do sistema. Existem muitos cenários que são implantados pelos empresários. No caso do primeiro ciclo de operação, algumas fazendas preferem usar uma unidade de transbordo por trator que apresenta maior agilidade no processo de carga e descarga. No entanto, tem o custo do equipamento, já que são necessários mais tratores e TB para atender à colhedora quando os outros TT se deslocam com os TB até o caminhão semirreboque para descarregar. Outras fazendas adotam poucos TT com mais unidades de transbordo atreladas a ela, ou seja, um trator rebocando mais TB. Só que isso implica em uma análise do tempo de manobra do comboio de TB para carga e descarga para saber os custos e quais seriam as vantagens que proporcionaria. Qualquer que seja o cenário aplicado recomenda-se sempre um estudo de simulação e de viabilidade técnica e econômica para fazer a melhor escolha.

No caso do segundo ciclo de operação, o processo de análise é similar a dos tratores transbordo e das unidades de transbordo, só que este ciclo depende do anterior. Neste ciclo de operação é importante definir o posicionamento geográfico do caminhão na frente de corte. Devido a que ele define os tempos de transbordo dos TT e TB até o C-SR e o tempo de deslocamento do C-SR até a usina, passando pelas fases 5, 6, 7 e 8 até retornar a seu novo posicionamento na frente de corte (FC). Essa informação indicará se é necessário outro caminhão semirreboque ou reboque para atender a demanda dos TT e TB e, por conseguinte da colhedora.

5.3. COLETA DE DADOS

O levantamento de dados realizou-se tomando o cuidado de não admitir evidências equivocadas ou enviesadas, que viessem a influenciar nos resultados e nas conclusões. Para

isso, acompanhou-se pessoalmente todo o processo de corte, carregamento e transporte da cana-de-açúcar até a usina, foram feitas 13 observações de cada processo logístico, coletados em maio de 2020. Os dados coletados foram os seguintes:

- a) Quantidade e tipos de equipamentos envolvidos no processo de CCT.
- b) Tempos gastos nas atividades e nos deslocamentos dos equipamentos ao longo de todas as fases do sistema logístico como se destaca na Figura 5.3. Essas fases relacionam-se ao carregamento dos TB pela colhedora, traslado desses TB pelos tratores ao malhador, descarregamento dos TB no caminhão semirreboque, traslado dos TB às frentes de corte, deslocamento do C-SR lotado à usina e retorno do mesmo à FC.
- c) Localização geográfica dos talhões, das frentes de corte para posicionamento dos C-SR no malhador, do posto de pesagem, do ponto de análise da amostra, da área do HT etc. Com esses dados obteve-se os tempos de deslocamentos que somado aos tempos gastos em cada atividade foi possível calcular o tempo total gasto em cada ciclo de operação.
- d) Tempos de engate e desengate dos semirreboques no cavalo mecânico e das unidades de transbordo nos tratores.
- e) Velocidade médias dos equipamentos. Esses dados foram coletados diariamente do sistema de bordo dos equipamentos usados na fazenda.
- f) Níveis de eficiência dos equipamentos. Para obter esses parâmetros selecionaram-se os indicadores descritos na Tabela 5.1.

Tabela 5.1 - Indicadores de eficiência dos equipamentos

Indicadores	Descrição
Tempo de operação ⁽¹⁾	Horas produtivas x horas paradas. Avalia efeito das funções de manutenção na operação.
Disponibilidade ⁽²⁾	Indica a disponibilidade do equipamento para trabalho. Equipamento em manutenção é considerado indisponível.
Utilização ⁽³⁾	Horas utilizadas x horas disponíveis. Avalia o efeito das horas perdidas em relação ao desempenho do equipamento.
Aproveitamento	Trata da programação da jornada de trabalho do equipamento. Medido pela parcela de tempo do dia ocupada pelo equipamento
Eficiência ⁽⁴⁾	Produto dos demais indicadores supracitados

(1) Refere-se aos abastecimentos de combustíveis e lubrificantes, regulagens e calibrações do implemento, manobras de cabeceira, mudança de talhão com deslocamento próprio, e limpezas.

(2) Quando esse indicador apresenta baixa eficiência existe associação direta com altos índices de quebra do equipamento.

(3) Níveis muito baixos indicam grande quantidade de horas perdidas por dia.

(4) Revela o tempo que o equipamento cumpre de fato a sua função produtiva.

5.4. APRESENTAÇÃO E CONSTRUÇÃO DO MODELO

Como supracitado foram visitadas três áreas de colheita que podem ser compostas por diversas frentes de cortes, dependendo da disponibilidade de colhedora, tratores transbordo, caminhões semi reboques, mão de obra e da necessidade da usina. A construção do modelo foi feita com o uso do software stella 10 e da metodologia *System Dynamics*.

O modelo pode ser didaticamente subdividido em três partes:

Capacidade da colheitadeira: Trata-se da relação de velocidade e eficiência do equipamento. A eficiência considera o tempo de operação, disponibilidade do equipamento para trabalho, utilização em horas e aproveitamento (ver tabela 5.3), e foi estruturada conforme a Figura 5.4.

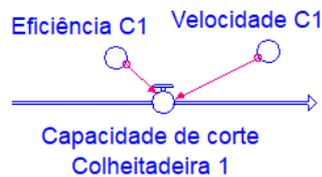


Figura 5.4 - Modelagem da capacidade da colheitadeira

Operação do trator de transbordo e conjunto semirreboque: Trata-se dos tempos de enchimento, engate e desengate, deslocamento, espera em fila de carregamento, e carregamento do C-SR. Os fluxos de deslocamentos (F1 a F4) são os tempos gastos para um trator transbordo desloque carregado da colheitadeira até a fila de carregamento que fica próxima a área onde os C-SR aguardam carregamento, essa distância varia de acordo com as condições de relevo e estágio da área de colheita (Figura 5.5).

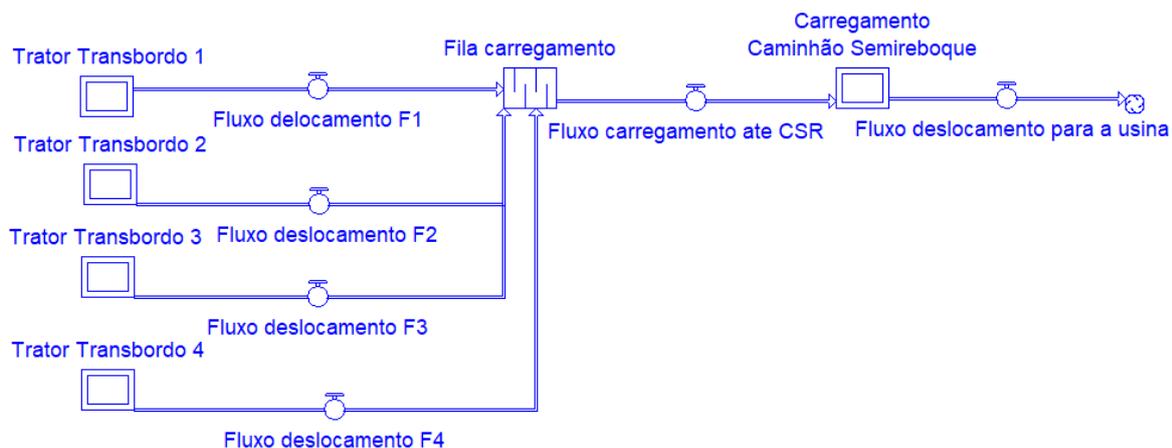


Figura 5.5 - Modelagem da operação do trator de transbordo e conjunto semirreboque

Operação na planta industrial: Trata-se dos tempos de chegada do C-SR na usina, considerando tempo de pátio ao fluxo de pesagem, tempo para amostragem, tempo no hilo tombador até o retorno para área de colheita (Figura 5.6).

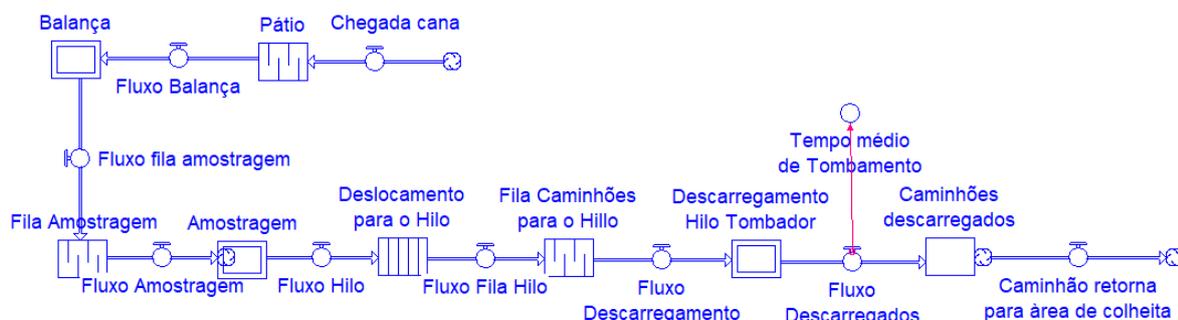


Figura 5.6 - Modelagem da operação na planta industrial

Nas três partes do modelo é possível identificar as variáveis estoque ou nível, que são aqueles elementos que mostram a cada estado a situação do modelo, ou seja, apresentam uma acumulação de valores e variam somente em função de outros elementos denominados fluxos. Nessa pesquisa pressupõe-se que as variáveis que têm esse comportamento de acúmulo ou estoque são: a cana-de-açúcar e os C-SR envolvidos no processo de colheita mecanizada e produção de etanol.

A variável do tipo fluxo representa a taxa de uma variável em relação ao tempo, nesse sentido, um fluxo estará sempre conectado a uma variável tipo estoque. Pode-se conectar o fluxo ao estoque de duas formas, como fluxo de entrada (*input*) e outra como fluxo de saída

(*output*), essas duas formas podem ser também do tipo bidirecional. Os conectores estabelecem as relações ente dois componentes na construção do modelo e podem ser utilizados como: constante de uma equação, para inserir uma equação, definir um controle por intervalo, o painel de controle do modelo encontra-se no Anexo A.

A complexidade deste problema é grande pela dimensão da área plantada que demanda de várias frentes de cortes, que envolve diversas variáveis importantes na modelagem do sistema CCT que abastece a demanda da usina. Foram modeladas duas frentes de corte mecanizado e um módulo da usina. Nos módulos das frentes dos cortes modelou-se o fluxo da colheita de 4 colhedoras de cana-de-açúcar e seus respectivos tempos de carregamento nos transbordos, considerando como variáveis influenciadoras a produtividade dos talhões, eficiência, capacidade de carga dos transbordos, velocidade média dos tratores de transbordo, tempo de carregamento e descarregamento dos transbordos e o tempo de deslocamento até os C-SR, tempo de carregamento dos C-SR, tempo de engate e desengate, tempo de deslocamento para a usina e peso médio das cargas de cana-de-açúcar.

5.5. IDENTIFICAÇÃO DAS VARIÁVEIS E DEMENSIONAMENTO

As Tabelas 5.2 a 5.4 apresentam como foram avaliadas as variáveis do modelo, estão divididos em atividades na fase colheita e na fase de usina considerando os tempos deslocamentos e atividades, além da velocidade de trabalho de alguns equipamentos.

Tabela 5.2 - Descrição dos tempos de deslocamentos na colheita

Atividades e deslocamentos		Descrição
1	Conjunto semi-reboque mais cavalo mecânico	Tempo gasto da balança da usina até o retorno na balança
2	Balança até a frente de colheita	Tempo gasto da balança até a frente de colheita
3	Frente de colheita até a balança	Diferença dos tempos dos deslocamentos 1 e 2
4	Engate de desengate	Tempo gasto para engate de desengate de semirreboques no cavalo mecânico
5	Enchimento	Tempo gasto que a colhedora gasta para encher os transbordos
6	Troca de transbordo	Intervalo de tempo entre saída de transbordo cheio e chegada de outro vazio
7	Transbordo até semi-reboque	Tempo gasto no deslocamento do transbordo até o semi-reboque após seu enchimento total
8	Enchimento de semi-reboque	Tempo gasto na transferência de carga do transbordo para o semi-reboque
9	Transbordo até colhedora	Tempo de retorno do transbordo até colhedora

Tabela 5.3 - Descrição dos tempos de deslocamentos na usina

Itens		Descrição
1	Balança	Tempo que o caminhão fica parado na balança para medição de peso
2	Deslocamento até amostragem	Tempo gasto no deslocamento do caminhão até a sonda de amostragem
3	Frente de colheita até a balança	Tempo gasto pela sonda de amostragem nos caminhões
4	Hilo tombador de cana	Tempo gasto para descarregar um caminhão na mesa alimentadora de cana
5	Retorno a balança	Tempo gasto para o caminhão vazio deslocar até a balança
6	Pesagem da tara	Tempo gasto para pesar o caminhão vazio

Tabela 5.4 - Descrição das velocidades dos equipamentos

Itens
Velocidade média do conjunto da usina para o campo
Velocidade média do conjunto do campo para usina
Velocidade média das colhedoras
Velocidade média do transbordo

Os indicadores de eficiência apresentados na tabela 5.5 compreendem, quando entre si associados, o grau de eficiência dos equipamentos, que por sua vez dependem diretamente da programação logística outrora planejada de acordo com a demanda da usina, esses indicadores podem ser formulados com os dados que estão no próprio computador de bordo dos equipamentos.

Tabela 5.5 - Indicadores de eficiência

Indicadores	Descrição
Tempo de operação	Horas produtivas x horas paradas. Avalia efeito das funções de manutenção na operação.
Disponibilidade	Indica a disponibilidade do equipamento para trabalho. Equipamento em manutenção é considerado indisponível.
Utilização	Horas utilizadas x horas disponíveis. Avalia o efeito das horas perdidas em relação ao desempenho do equipamento.
Aproveitamento	Trata da programação da jornada de trabalho do equipamento. Medido pela parcela de tempo do dia ocupada pelo equipamento
Eficiência	Produto dos demais indicadores supracitados

O tempo de operação refere-se aos abastecimentos de combustíveis e lubrificantes, regulagens e calibrações do implemento, manobras de cabeceira, mudança de talhão com deslocamento próprio, e limpezas. A disponibilidade tem uma relação direta com quebra de equipamento, ou seja, se esse indicador apresentar baixa eficiência é um indicativo de altos

índices de quebra de equipamentos. Quando o indicador “utilização” apresenta níveis muito baixos indica grande quantidade de horas perdidas por dia. E o aproveitamento revela o tempo que o equipamento cumpre de fato a sua função produtiva.

5.6. RESULTADOS DA PESQUISA DE CAMPO

Os resultados obtidos da pesquisa de campo são apresentados em três categorias e eles são correspondentes à safra 2019/2020. Na primeira e segunda categoria discriminam-se os tempos gastos por evento/atividade obtidos das 13 observações realizadas. Na terceira classe são apresentadas as velocidades registradas dos sistemas de bordo dos equipamentos utilizados na fazenda-indústria.

5.6.1. Análise dos tempos nas frentes de corte

Analisando as 13 amostragens realizadas foi perceptível observar variações nos tempos de deslocamento dos caminhões semirreboques voltando às frentes de corte, tal como se mostra na linha 1 da Tabela 5.6 e Figura 5.7. No caso dos C-SR saindo do malhador para a balança pode-se perceber que a variação dos tempos de deslocamento apresenta um comportamento oscilatório (Figura 5.7), e a média desses valores é maior que a média dos tempos do primeiro evento (linha 2 da Tabela 5.6). Em ambos os casos essas diferenças se devem ao posicionamento dos equipamentos nas frentes de corte que variam na medida que se avança na área de colheita, embora as rotas sejam predefinidas com antecedência.

Tabela 5.6 - Tempos gastos por observação por evento/atividade (em minutos)

Evento	Tempo gasto em cada observação por evento (em minutos)													Média
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	
1 C-SR da balança até as FC	28,32	34,14	35,16	36,18	39,15	36,21	40,26	37,54	29,00	28,60	33,52	29,61	31,81	33,81
2 C-SR até a balança	36,72	51,26	39,33	19,25	30,85	45,25	50,22	51,23	31,22	27,22	33,54	40,21	42,51	38,37
3 Engate e desengate	1,42	1,45	1,55	1,62	1,42	1,40	1,38	0,88	0,98	0,95	1,32	1,21	1,19	1,29
4 Carregamento dos TB	13,72	12,74	11,12	10,45	9,84	11,12	13,92	12,84	12,74	14,21	13,21	16,51	16,22	12,97
5 Troca de TB	1,55	1,62	1,16	1,02	0,55	0,89	0,98	0,87	1,03	1,05	1,10	1,33	1,00	1,09
6 TB até o C-SR	9,68	10,77	11,12	13,96	4,82	3,52	7,62	3,24	7,56	9,54	9,77	8,54	5,69	8,14
7 TB até o FC	6,44	5,57	4,85	4,45	5,06	8,08	10,20	7,08	4,09	10,55	8,44	4,33	2,44	6,28

Quando analisado em conjunto todos os deslocamentos dos C-SR de todas as frentes de corte até a balança observa-se a existência de uma grande variação nos tempos, devido à diferença entre as equipes, rendimento de cada colhedora, formação de filas durante o carregamento e até a movimentação de caminhões nas vias. Das 13 análises realizadas no módulo das FC primárias obteve-se um tempo médio de 87 minutos e desvio padrão de 26 minutos. No

módulo das FC secundárias, com 13 observações, o tempo médio alcançado foi bem maior, 139 minutos, e o desvio padrão de 44 minutos.

O tempo de engate e desengate teve comportamento mais linearizado do que os demais, com desvio padrão baixo, 0,22 (linha 3 da Tabela 5.6), devido ser um procedimento padrão, que só aumenta em casos excepcionais quando é um problema mecânico-operacional. Considerando áreas com produtividade semelhante levantaram-se os tempos de carregamento dos TB, a média ficou com 12,97 minutos (linha 4 da Tabela 5.6). Esses valores mudam quando a produtividade por metros quadrados da cana-de-açúcar se altera.

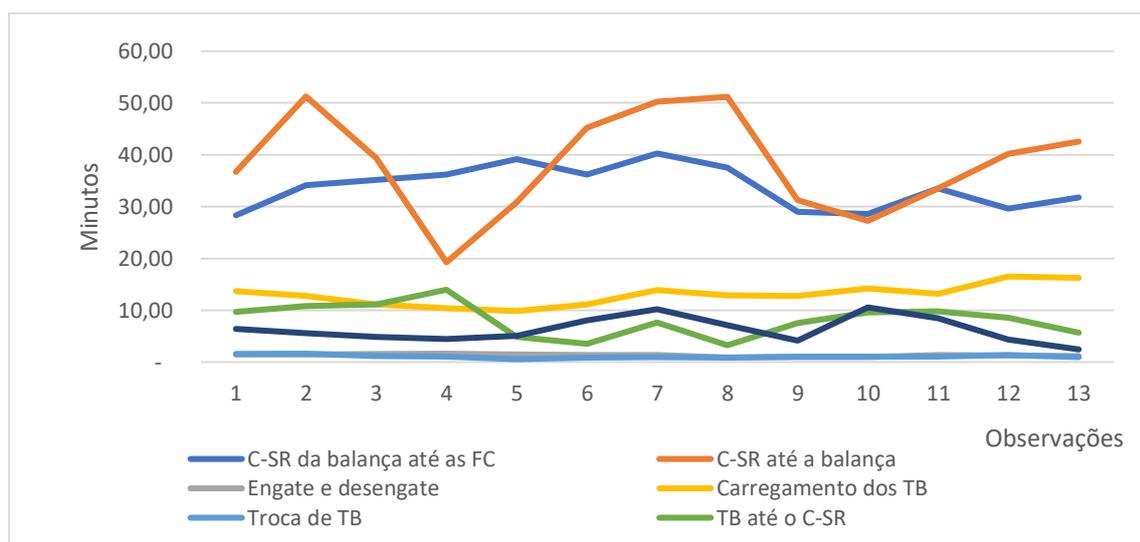


Figura 5.7 - Tempos Médios por Observação por Evento (em minutos)

O tempo de troca do TB é considerado uma atividade de baixa expressão no processo. Entretanto, alguns gargalos como filas no descarregamento dos transbordos no conjunto C-SR, falta de qualificação dos operadores causam elevações nos tempos de troca dos TB, que em algumas amostras foram significativas (linha 5 da Tabela 5.6). Os atrasos na troca dos transbordos, faz com que estes demorem para retornar à colhedora, ficando o sistema prejudicado, pois a colhedora fica ociosa. A atividade de deslocamento do TB até o C-SR tende a ter desvio padrão elevado (linha 6 da Tabela 5.6) pelo fato de depender a priori da distância do carregamento e das colhedoras que estão na operação.

O tempo de enchimento do C-SR apresentou baixa variação por se tratar de um procedimento padrão, que é o levantamento hidráulico do equipamento (por isso não se mostram na Tabela 5.6), a média é de 3,621 minutos e desvio padrão de 1,478. O tempo de deslocamento do TR até a colhedora apresentou desvio padrão elevado em algumas amostras, esse fato está

associado mais uma vez à distância da frente de carregamento até a localização das colhedoras (linha 7 da Tabela 5.6).

5.6.2. Análise dos tempos na usina

O tempo médio de pesagem na balança teve vários picos que se deram por conta da formação de filas, mesmo contando com um sistema automatizado que tende a gerar padronizações de tempo (linha 1 da Tabela 5.7). Como a balança não pode ser duplicada no sistema, em casos de filas muito grandes algumas usinas optam por usar a média normal de peso e liberar os C-SR para continuarem na seguinte fase sem ter que pesasse.

Tabela 5.7 - Tempos Gastos por Observação por Evento/Atividade (em minutos)

	Evento	Tempo médio gasto em cada observação por evento (em minutos)													Média	Desvio Padrão
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13		
1	Pesagem	2,09	3,06	4,22	3,46	5,63	6,54	6,53	4,55	5,50	3,32	3,65	3,88	4,21	4,36	1,30
2	Tombamento	6,23	8,16	7,21	8,54	9,56	8,47	7,12	6,88	9,65	7,65	6,21	7,31	6,15	7,63	1,14

O tempo de deslocamento do C-SR até o local da amostragem onde é realizado o teste da cana apresentou valores elevados, mas é preciso considerar que apenas 30% dos C-SR passam por esse processo, o que altera significativamente o valor médio que foi de 5,781 minutos e desvio padrão de 1,077. O deslocamento do C-SR até o hilo de tombamento ficou menor que um minuto, com desvio padrão de 0,121, tendo uma baixa representação no sistema como um todo (Figura 5.8).

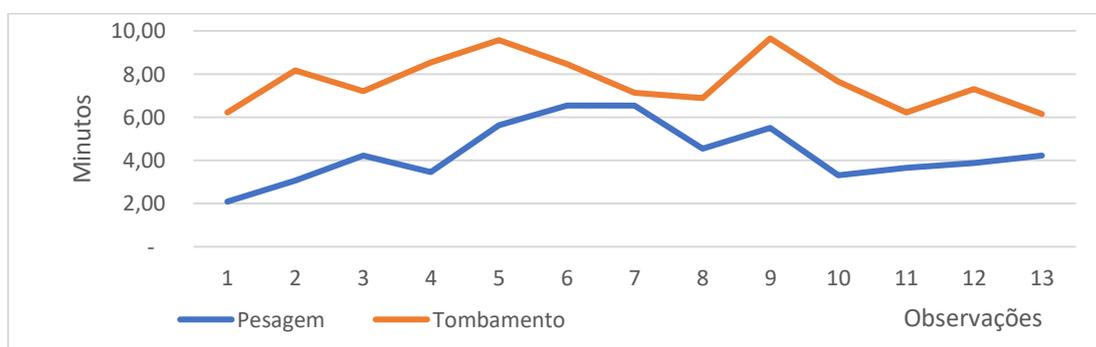


Figura 6.8 - Tempos por Observação por Evento/Atividade (em minutos)

O tempo de tombamento depende do processo de moagem dentro da usina, desta forma, ocorreram algumas oscilações nas observações realizadas, tal como se apresenta na Figura 5.9 e na linha 2 da Tabela 5.7. O tempo de deslocamento do C-R vazio do hilo até a balança

apresentou variações pouco significativas, com média de 0,787 minutos e desvio padrão de 0,12, esse procedimento depende apenas do desempenho do veículo e do motorista.

5.6.3. Velocidades dos equipamentos

As velocidades médias para as amostras estudadas não apresentaram grandes oscilações, com média de 40,02 km/h no sentido usina-campo, e 31,32 km/h no sentido campo-usina, conforme Tabela 5.8 e Figura 5.9.

Tabela 5.8 - Velocidade do C-SR por Observação por Evento/Atividade (em km/hora)

Evento	Velocidade do C-SR por evento (em km/hora)													Média	Desvio Padrão
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13		
Usina - FC	40,10	42,30	39,40	37,60	40,00	37,30	36,20	37,40	42,30	42,00	43,50	39,21	43,00	40,02	2,34
FC - Usina	31,20	24,50	34,50	31,30	28,40	28,60	33,90	30,00	31,80	35,50	36,40	31,70	29,40	31,32	3,14

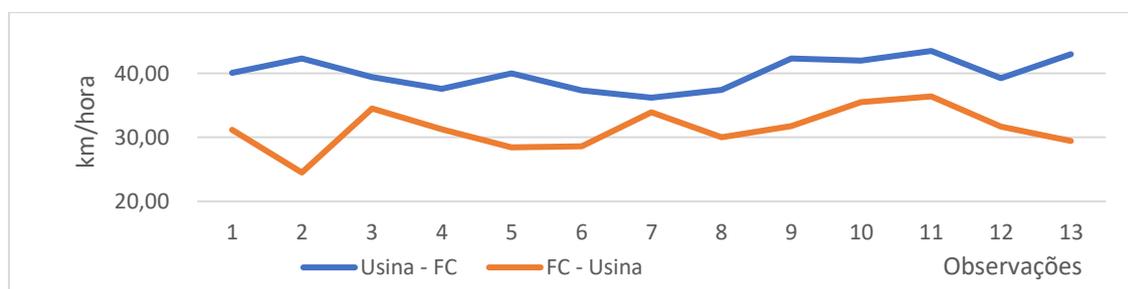


Figura 5.9 - Velocidade do C-SR por Observação por Evento/Atividade (em km/hora)

A velocidade média das unidades de transbordo apresentadas na Tabela 5.9 são referentes a amostra de 20 tratores da usina, contemplando apenas parcelas de tempo produtivas, e excluindo tempo de abastecimento, velocidade em trânsito, limpeza etc. A amplitude de 4,38 a 6,87 km/h, e média de 5.83 km/h.

Tabela 5.9 - Velocidade Média dos TB por Amostras (em km/hora)

Amostras	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	Mé dia
Média (km/h)	5,9	6,1	5,2	4,9	6,1	6,5	4,4	5,6	6,3	6,0	4,8	5,5	5,2	6,4	9,0	5,2	5,8	5,8	6,9	5,4	5,8
Desvio Padrão	1,4	1,4	2,0	2,1	2,9	1,6	1,9	1,7	1,9	2,8	3,2	0,9	2,0	1,7	1,8	1,3	1,2	2,0	2,3	2,5	1,9

Na Tabela 5.10 apresenta-se a velocidade média de 20 colhedoras que foi de 5,89 km/hora, considerando somente tempo produtivo. Ou seja, aqueles tempos como momento em trânsito fora de trabalho, abastecimento, limpeza e mudança de área não foram incluídos. As

variações observadas nesses dados são reflexo dos diferentes modelos de colhedoras disponíveis, algumas com sistema por esteira, e outras com rodante composta por pneus.

Tabela 5.10 - Velocidade Média das Colhedoras por Amostras (em km/hora)

Amostras	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	Mé dia
Média (km/h)	5,9	6,1	5,2	4,9	5,2	6,5	7,4	6,6	4,3	6	5,8	5,6	5,4	6,7	6,2	5,5	6,7	5,7	6,9	5,4	5,9
Desvio Padrão	1,4	1,4	1,1	2,1	2,9	2,6	2,9	1,7	2,9	2,8	3,2	0,9	2	1,7	2,8	1,5	1,1	2,7	2,3	2,5	2,1

5.7. VALIDAÇÃO E EXPERIMENTAÇÃO DO MODELO

O modelo foi validado em diferentes etapas. Inicialmente foram utilizadas as informações obtidas em artigos científicos, dissertações e teses, além de entrevistas com os gestores da usina. Assim, fica caracterizada a validação nominal, posto que foram utilizados dois especialistas (um da área de operações logísticas e outro da área de produção) para auxiliar na definição das variáveis relevantes a serem empregadas na modelagem proposta.

Em seguida, na segunda etapa de validação, referente à execução do modelo no simulador Stella® 10, foram utilizados os dados colhidos em campo obtidos junto a usina objeto deste estudo, além de informações relevantes sobre as relações das variáveis do sistema produtivo, conseguidas com os gestores da organização, com o objetivo de verificar a integração entre todas as variáveis componentes do modelo e de efetuar a análise dos resultados gerados.

5.8. SIMULAÇÕES

As simulações do modelo foram desenvolvidas tendo como base a capacidade de processamento de cana-de-açúcar na planta industrial, as velocidades dos maquinários e os tempos das atividades atuais, esses dados levantados para cada um dos processos são as sementes dentro de cada variável do modelo.

Foram consideradas duas premissas nas simulações desse modelo de integração;

- **Premissa 1:** trata-se da transmissão de volatilidades nas séries de preços do etanol ao longo da cadeia produtiva que foi estudada na seção 5 da presente pesquisa. Essa premissa considera que a existência de transmissão de volatilidades causa maiores impactos nos agentes a montante da cadeia produtiva, e que o comportamento dos agentes produtores de etanol (usinas) afeta diretamente a função de produção e por consequência as atividades logísticas e produtivas.
- **Premissa 2:** relaciona-se à sincronização, na qual é necessário existir um plano de produção sincronizado baseado na capacidade de fabricação e níveis de estoque em tempo real. Este tipo de produção deve estar coordenado com o comportamento da demanda e com a previsão de produção, sendo importante para definir o que produzir e o quanto produzir.

Assim, assumiu-se os seguintes cenários

- **Cenário 1:** incremento de 5% na quantidade produtiva prevista de etanol na usina. Parâmetros produtivos reais coletados dos processos logísticos produtivos da usina e frente de corte descritos nas Tabelas 5.2 a 5.4;
- **Cenário 2:** incremento de 10% na quantidade produtiva prevista de etanol na usina, demais parâmetros do cenário 1;
- **Cenário 3:** cenário sincronizado com ações coordenadas, demais parâmetros do cenário 1. Nesse cenário os indicadores de eficiência descritos na Tabela 5.11 são ajustados para seus limites superiores.

Desta forma fez-se então a média de 500 observações realizadas nas simulações do modelo do sistema atual, e desenvolveu-se as perspectivas de demanda da usina para simular um cenário com sincronia entre oferta e demanda (Figura 5.10).

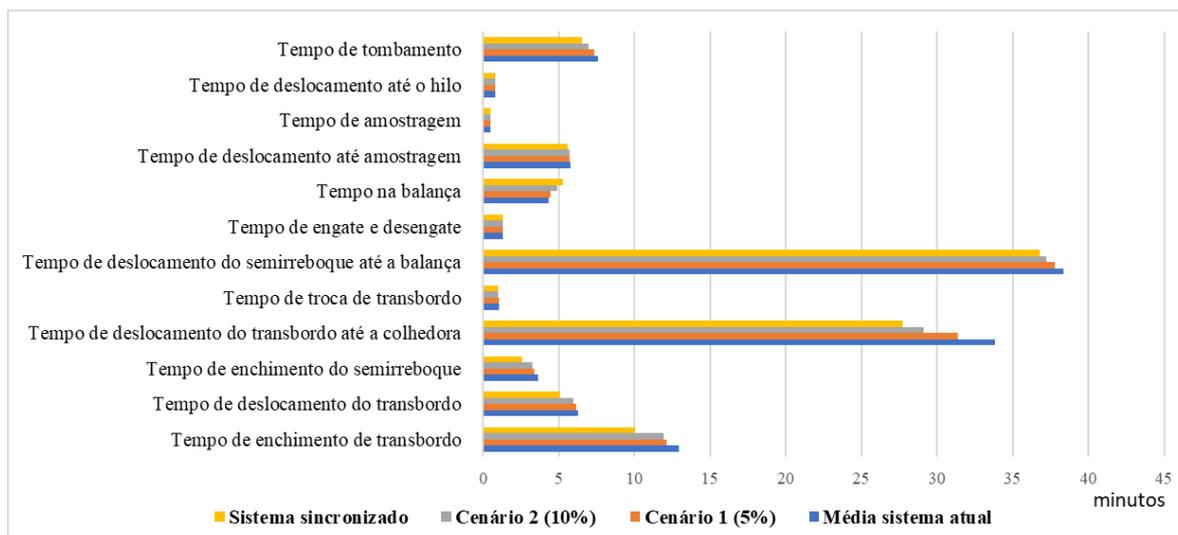


Figura 5.10 - Simulações

Nota-se na Figura 5.10 que a medida em que se aumenta a quantidade produzida os tempos são reduzidos em quase todos os processos das simulações, com exceção do tempo de pesagem que se elevou em 0,95% quando comprado com o sistema sincronizado. Os tempos no cenário de sincronização são geralmente mais curtos (-15,7 min acumulado) sendo a exceção o tempo de pesagem devido à limitação do número de balanças. Portanto, à medida que há um aumento no número de veículos para o sistema sincronizado, haverá também maiores filas nas balanças.

Além disso, com o aumento do sistema de produção, o setor agrícola tende a otimizar os processos de colheita, utilizando o maquinário de forma mais eficiente. Desta forma os veículos, equipes, maquinários e processos são otimizados com tendência a serem mais produtivos, tendo reduções de tempo dos processos logísticos-produtivos nas principais atividades da fase de colheita.

Em relação ao tempo de descolamento do conjunto semi-reboque até a balança, observou-se durante a coleta dos dados a existência de grande variação nos tempos, isso é devido a diferença entre equipes, rendimento da colhedora, filas durante o carregamento e das movimentações de caminhões nas vias.

À medida em que a planta industrial sinaliza aumento da produção, o setor agrícola organiza os processos de colheita, ou seja, organiza-se o planejamento de produção e programam o número de maquinários e equipe de funcionários. Entretanto, os resultados não apontaram ganhos significativos na performance das velocidades dos veículos e das eficiências das

colheitadeiras quando comparados as variações entre cenário atual e cenário sincronizado, Tabela 5.11.

Tabela 5.11 - Simulações

Variáveis	Média sistema atual	Cenário 1 (5%)	Cenário 2 (10%)	Sistema sincronizado	Varição
Velocidade do caminhão cheio (Km/hora)	31,32	31,3	30,87	30,13	-1,19
Velocidade do caminhão vazio (Km/hora)	40,02	40,02	40,02	40,02	0
Velocidades das colhedoras (Km/hora)	5,89	6,05	6,2	7,01	0
Eficiência das colhedoras (%)	81,91	82,13	84,71	92,81	10,9
Produtividade da cana (t/ha)	75,3	75,3	75,3	75,3	0

Nas linhas 3 e 4 da Tabela 5.11 percebe-se que as colhedoras aumentaram sutilmente as suas velocidades, assim como a eficiência, que no sistema sincronizado elevou-se aproximadamente 11%. Segundo os gerentes de frente de corte, a velocidade máxima permitida para as colhedoras operarem de no máximo 7.5 km/h, sendo assim, nas simulações esse limite foi respeitado. Sobre a eficiência das colhedoras apresentar uma performance significativamente maior no cenário síncrono, se dá pelo fato de que as paradas combinadas do maquinário estão organizadas com a chegada dos tratores de transbordo.

Segundo os gerentes de produção da usina, o incremento da quantidade a ser produzida ocorre principalmente pelo aumento do preço pago pelo litro do etanol. Sendo assim, estruturou-se a Tabela 5.12 que apresenta as variações dos preços do litro do etanol na revenda e a produção real da usina do estudo de caso dessa pesquisa no ano de 2021.

Tabela 5.12 - Variações de preços e quantidade do etanol na usina em 2021

Meses	Preço do etanol (litro em São Paulo)	Varição percentual preço do etanol	Quantidade produzida (mil metros cúbicos)	Varição percentual quantidade produzida
Abril	R\$ 2,54	-	38777,78	-
Maio	R\$ 2,93	15,1%	40484,00	4,4%
Junho	R\$ 2,92	-0,2%	42143,84	4,1%
Julho	R\$ 2,93	0,2%	44208,89	4,9%
Agosto	R\$ 3,13	6,8%	46684,59	5,6%
Setembro	R\$ 3,26	4,3%	50092,57	7,3%
Outubro	R\$ 3,55	8,9%	54250,25	8,3%
Novembro	R\$ 3,70	4,1%	59783,77	10,2%

Fonte: Cepea (2021) sem frete, ICMS, PIS/Cofins zerados.

Observa-se que com o aumento do preço do etanol a usina aumentou sua produção. Mesmo com variações positivas maiores no preço do etanol como a que ocorreu no mês de maio

(+15%, linha 2) é notório nessa série de dados que a variação percentual da quantidade produzida foi maior quando o preço do etanol ultrapassou a casa dos R\$ 3,00/litros (a partir da linha 5), e com variação acumulada da produção de 44,8%.

A elevação dos preços pagos no litro do etanol atua como indicador para aumento da produção, ao passo que a sincronização ocorre quando a coordenação orientada ao fluxo está presente na cadeia de processos logísticos-produtivos e previstas no planejamento, o que aumenta a performance das atividades, principalmente na fase de colheita.

A Figura 5.11 ilustra a sincronização sob a realidade da usina, na qual tem-se, ações coordenadas e ações não coordenadas. As ações coordenadas proporcionam comportamento ativamente sincronizado com elevada eficiência, reduzindo efeitos negativos como atrasos de equipe e equipamentos, quebra de equipamentos por uso contínuo sem manutenção programada, falta de padronização de velocidades dos veículos, programação de chegada e saída na planta industrial (filas na balança).



Figura 5.11 – Perspectiva da sincronização

As ações não coordenadas geram sincronização emergente, ou seja, ocorre de forma endógena por um fenômeno auto emergente no sistema, causado por interações internas. Isso não significa que o sistema está atuando em eficiência máxima, apenas sinaliza que existe tendência para autorregulação das atividades ao longo do tempo.

Os levantamentos de campo realizados nessa pesquisa apontam que existem diversas ações não coordenadas nos processos logísticos e produtivos dessa usina que causam efeitos negativos, tais como: filas de caminhões nas balanças, filas de tratores de transbordo no carregamento dos veículos semi-reboque, falta de programação da localização dos veículos semi-reboque, troca de equipes.

Sendo assim, ações externas como o planejamento de produção baseado na demanda, ajustes nos sistemas logístico e produtivo em tempo real podem minimizar a presença de ações não coordenadas, e nessa perspectiva a sincronização pode proporcionar à usina uso de sua capacidade produtiva mais elevada, além de proporcionar flexibilização do sistema produtivo.

A expectativa do ponto de vista de governo é que a usina produza em sua capacidade máxima, para que o preço ao consumidor tenda a ser minimizado, considerando que quanto maior a oferta em conjunto das usinas menor será o preço ao consumidor. Por outro lado, a empresa não analisa com a ótica governamental e produz segundo critérios internos, objetivando sempre maximizar os próprios lucros, e assim precisa-se considerar que a usina pode produzir tanto etanol quando açúcar, que depende do produto que no momento da decisão da composição do mix produtivo estiver mais rentável.

No Brasil, as usinas têm disponibilidade de grande volume de biomassa na própria usina na forma de bagaço, o que ajuda na viabilidade econômica e auxilia na atração de investidores externos nas empresas nacionais. Isso auxilia no processo de desenvolvimento da usina, mas também impacta nas decisões de produção no médio prazo já a usina pode considerar segurar estoque de etanol afim de aguardar elevações nos preços. Os obstáculos nos processos de produção, podem sem o planejamento correto prejudicar a performance do funcionamento contínuo dos equipamentos, o que normalmente se associa a custos altos.

As frentes de cortes de usinas sucroenergéticas, dependem das decisões dos gestores para intensificar ou não o trabalho, e os gestores devem decidir o quanto vão produzir ou vender de seus estoques. Portanto, o planejamento dos processos logísticos produtivos embora projetado para ter elevado nível de produtividade, continua a enfrentar condições desafiadoras devido à mudança dinâmica de mercado.

6. CONCLUSÕES

O desenvolvimento do presente trabalho demonstrou que é possível sincronizar os processos logísticos e produtivos com a demanda de mercado para subsidiar o planejamento e gestão de usinas sucroenergéticas no Brasil.

Considera-se que os objetivos inicialmente estipulados para o presente trabalho foram integralmente atingidos.

Objetivo geral: O objetivo geral dessa pesquisa consiste em desenvolver um modelo de simulação que otimize os sistemas logístico e produtivo das usinas sucroenergéticas em função da demanda de mercado. Esse modelo de sincronização oferta-demanda permitirá subsidiar os tomadores de decisão no planejamento e gerenciamento de usinas sucroenergéticas brasileiras, buscando diminuir o impacto das oscilações dos preços do açúcar e do etanol na capacidade produtiva e logística desse setor produtivo.

De fato, o modelo de sincronização foi construído considerando os desafios iniciais de se analisar o comportamento da demanda nos diferentes elos da cadeia produtiva. Esse modelo inovou ao trazer essa abordagem de sincronização de processos logísticos e produtivos da usina baseado nas perspectivas das transmissões de volatilidades na cadeia produtiva, e apresentando alguns insights sobre os fenômenos de sincronização que ocorrem em sistemas produtivos de usinas de etanol, que serão úteis tanto para melhorar e controlar processos logísticos produtivos, quanto para tomada de decisões gerenciais.

Por meio do trabalho, foi desenvolvido um aplicativo PWA (*progressive web application*) utilizando a linguagem Angular de código-fonte aberto, que contém um script que corre no plano de fundo, e posiciona-se entre o usuário e o modelo de sincronização, permitindo o acesso a base de dados do modelo para aplicações gerenciais e replicação do modelo. A usina objeto do estudo de caso dessa pesquisa está fazendo uso desse aplicativo desde setembro de 2022.

Para acessar o aplicativo leia com sua câmera o QR Code no Anexo B, ou através desse link: <https://uqr.to/1dldg>.

Objetivo específico 01: desenvolver um modelo de transmissão de volatilidade de preços para o setor sucroenergético;

O modelo GARCH-BEKK triangular inferior assimétrico foi escolhido para análise de transmissão de volatilidade, e por ser mais abrangente que outros modelos convencionais capturou diversos fatos importantes como a presença de clusters de volatilidade, direção das transmissões da volatilidade, e principalmente identificou que as transmissões causam mais impactos a montante da cadeia produtiva do que a jusante.

Objetivo específico 02: Desenvolver um modelo dinâmico dos processos logísticos-produtivos e integrar os coeficientes de transmissão de volatilidades.

Fez-se a escolha de trabalhar com a metodologia *system dynamics* para construção do modelo de sincronização dos processos logísticos produtivos com a demanda. O modelo permitiu a visualização de diferentes cenários, sendo dois desses de ampliação da produção de etanol com sinalização prévia para setor de corte, e um último cenário sincronizado, em que as ações logísticas e produtivas ocorrem de forma coordenada.

A análise aos resultados dos cenários propostos permite algumas reflexões:

Impactos da sincronização dos processos logísticos produtivos com efeitos de ganho de performance nos sistemas da usina sucroenergética:

A quantificação da sincronização deve estar conectada às medidas do sistema de produção. Particularmente no que diz respeito à questão se a sincronização é benéfica ou não, a avaliação do impacto da sincronização no desempenho logístico é um pré-requisito. Embora seja amplamente assumido que a sincronização pode ser benéfica na redução de estoque e melhorando o fluxo produtivo, o aumento de eficiência dos processos logísticos produtivos da usina se dará principalmente nas performances de tempos e no uso de equipamentos nas frentes de cortes.

Alguns fenômenos endógenos também podem ter efeito prejudicial no sistema. Consequentemente, a relação da sincronização com o desempenho, deve ser analisada na ótica dos indicadores pertinentes ao setor produtivo, e que podem ser variados de acordo com a realidade de cada frente de corte.

A sincronização logística produtiva como meta ideal para usinas sucroenergéticas:

A sincronização pode ocorrer em maior ou menor grau nos sistemas produtivos das usinas. Relacionado ao impacto nas metas logísticas produtivas, é necessário saber como o grau de sincronização pode ser ajustado para que seja possível atingir uma meta ideal. Diferentes sistemas de corte têm requisitos variados: para alguns sistemas, muita sincronização pode ser prejudicial e, portanto, precisaria ser evitado, enquanto para outros a sincronização pode ser de alta importância e precisaria ser acionado.

Consequentemente, os parâmetros que afetam o nível de sincronização emergente em sistemas de corte 100% mecanizados serão diferentes dos sistemas de corte híbridos, sendo importante que se considerem as propriedades estruturais e dinâmicas dos sistemas de corte para definição de metas.

6.1. LIMITAÇÕES E RECOMENDAÇÕES PARA ESTUDOS FUTUROS

Apesar dos resultados das simulações mostrarem os benefícios em um sistema sincronizado, deve-se levar em considerações de que a usina do estudo de caso possui colheita 100% mecanizada, sendo esse modelo aplicável apenas para esse tipo de sistema CCT. Os processos de armazenagem da cana-de-açúcar não foram considerados, e existe um estoque mínimo dentro da do pátio da usina que é usado para controle e garantia de continuidade produtiva. Na fase de modelagem dos processos logísticos produtivos podem ser usados dados estocásticos a fim de simular outras perspectivas.

Sistemas de CCT 100% mecanizados, possuem sistemas logísticos necessários para operar com eficiência sem desperdício de recursos ou tempo. Maquinários e equipes de trabalho garantem a funcionalidade do sistema, e o objetivo de longo prazo de obter a sincronização requer de a usina investigar a partir de uma perspectiva quantitativa de todos os eventos logísticos produtivos. Nesse sentido, indica-se para pesquisas futuras aprofundar o estudo dos fluxos de produção para frentes de corte híbridas de sistemas de CCT de regiões menos tecnificadas, incluir o custo de armazenagem como fator para tomada de decisão de composição do portfólio, e na decisão de quantidade a ser produzida entre etanol e açúcar.

A análise de sincronização sugerida por Becker *et al.* (2013), que faz uso da correlação de Cross para medir o grau de sincronização linear entre duas séries temporais, pode ser

estruturada em trabalhos futuros, a fim de tentar perceber o nível de interação das duas séries temporais em determinado intervalo de tempo para cada fase do sistema de produção.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, D.; HOTTA, L.; RUIZ, E. MGARCH models: tradeoff between feasibility and flexibility. 2015.

ALMEIDA, P. R. A.; WANDER, A.; FIGUEIREDO, R. Análise Sistêmica de Competitividade: Cadeia exportadora de feijões brasileira. 1ª Ed. Washington: Amazon, 2015.

AMBROSINO, D.; SCUTELLÀ, M. G. Distribution network design: new problems and related models. *European Journal of Operational Research*, v. 165, n. 3, p. 610-624, 2005.

ANDERSEN, T. G.; BENZONI, L.; LUND, J. Stochastic volatility, mean drift, and jumps in the short-term interest rate. Unpublished Working Paper, <http://www.jesperlund.com>, 2004.

ANDERSEN, T. G.; CHUNG, H.; SØRENSEN, B. E. Efficient method of moments estimation of a stochastic volatility model: A Monte Carlo study. *Journal of econometrics*, v. 91, n. 1, p. 61-87, 1999.

ANDRADE, A. Pensamento sistêmico: um roteiro básico para perceber as estruturas da realidade organizacional. *READ – Revista Eletrônica de Administração*, 5. ed., v. 3, n. 1, jun. 1997. Disponível em: <<http://read.adm.ufrgs.br/read05/artigo/andrade.htm>>. Acesso em 21.12.2011.

ANDRADE, M. C. Modernização e pobreza: a expansão da agroindústria canvieira e seu aspecto ecológico e social. São Paulo: Unesp, 1994.

ASAI, M.; MCALEER, M.; YU, J. Multivariate stochastic volatility: a review. *Econometric Reviews*, v. 25, n. 2-3, p. 145-175, 2006.

ARSHINDER, A.K.; DESHMUKH, S. G. Supply chain coordination: Perspectives, empirical studies and research directions, *Int. J. Prod. Econ.* 115 (2008) 316–335.

BAILLIE, R. T.; MYERS, R. J. Bivariate GARCH estimation of the optimal commodity futures hedge. *Journal of Applied Econometrics*, v. 6, n. 2, p. 109-124, 1991.

BAJAY, S. V. Geração termelétrica, Nota Técnica para a União da Indústria de Cana-de-açúcar, Núcleo Interdisciplinar de Planejamento Energético – NIPE, Universidade Estadual de Campinas – Unicamp, Campinas, SP, agosto de 2009.

BALLOU, R. Gerenciamento da cadeia de suprimentos: logística empresarial. 5ªed. Porto Alegre: Bookman, 2006.

BALLOU, R. Logística Empresarial: transportes, administração de materiais e distribuição física. São Paulo: Atlas, 1993.

BATALHA, M. O.; SOUZA, F. O agronegócio no Mercosul: uma agenda para a competitividade. São Paulo: Editora Atlas, 2009. v. 1. 448 p.

BAUWENS, L.; HAFNER, C. M.; LAURENT, S. Handbook of volatility models and their applications. John Wiley & Sons, 2012.

BAUWENS, L.; HAFNER, C. M.; PIERRET, D. Multivariate volatility modeling of electricity futures. *Journal of Applied Econometrics*, v. 28, n. 5, p. 743-761, 2013.

BAUWENS, L.; LAURENT, S.; ROMBOUTS, J. K. Multivariate GARCH models: a survey. *Journal of applied econometrics*, v. 21, n. 1, p. 79-109, 2006.

BECKER, T.; CHANKOV, S. M.; WINDT, K. Synchronization Measures in Job Shop Manufacturing Environments, *Procedia CIRP*. 7 (2013) 157-162.

BERNDT, E. R. Estimation and inference in nonlinear structural models. In: *Annals of Economic and Social Measurement*, Volume 3, number 4. NBER, p. 653-665, 1974

BLACK, F. Studies of stock price volatility changes. *Proceedings from the American Statistical Association, Business and Economic Statistics Section* 177–181, 1976.

BOLLERSLEV, T. Generalized autoregressive conditional heteroskedasticity. *Journal of econometrics*, v. 31, n. 3, p. 307-327, 1986.

BOLLERSLEV, T. Glossary to arch (garch). *CREATES Research Paper*, v. 49, 2008.

BOLLERSLEV, T. Modelling the coherence in short-run nominal exchange rates: a multivariate generalized ARCH model. *The review of economics and statistics*, p. 498-505, 1990.

BOLLERSLEV, T.; ENGLE, R. F.; NELSON, D. B. ARCH models. *Handbook of econometrics*, v. 4, p. 2959-3038, 1994.

BOLLERSLEV, T.; ENGLE, R. F.; NELSON, D. B. ARCH models. *Handbook of econometrics*, v. 4, p. 2959-3038, 1994.

BOLLERSLEV, T.; ENGLE, R. F.; WOOLDRIDGE, J. M. A capital asset pricing model with time-varying covariances. *The Journal of Political Economy*, p. 116-131, 1988.

BOLLERSLEV, T.; WOOLDRIDGE, J. M. Quasi-maximum likelihood estimation and inference in dynamic models with time-varying covariances. *Econometric reviews*, v. 11, n. 2, p. 143-172, 1992.

- BOUSSAMA, F.; FUCHS, F.; STELZER, R. Stationarity and geometric ergodicity of BEKK multivariate GARCH models. *Stochastic Processes and their Applications*, v. 121, n. 10, p. 2331-2360, 2011.
- BOWERSOX, D. J.; CLOSS, D. J.; COOPER, M. B. *Gestão Logística de Cadeias de Suprimentos*. Porto Alegre: Bookman, 2006.
- BOWERSOX, D. J.; CLOSS, D. J. *Logística Empresarial: O Processo de Integração da Cadeia de Suprimento*. São Paulo: Editora Atlas S.A., 2001.
- BOX, G. P.; JENKINS, G. M.; REINSEL, G. C. *Time series analysis: Forecasting and control*. San Francisco: Holdenday, 1976.
- BRAIONE, M.; SCHOLTES, N. K. Forecasting value-at-risk under different distributional assumptions. *Econometrics*, v. 4, n. 1, p. 3, 2016.
- BROOKS, C.; PERSAND, G. The effect of asymmetries on stock index return Value-at-Risk estimates. *The Journal of Risk Finance*, v. 4, n. 2, p. 29-42, 2003.
- BROYDEN, C. G.; FLETCHER, R.; GOLDFARB, D. DF Shanno. *J. Inst. Math. Appl.*, v. 6, p. 76, 1970.
- BURNS, P. The quality of Value at Risk via univariate GARCH. Available at SSRN 443540, 2002.
- CAO, M.; ZHANG, Q. Supply chain collaboration: Impact on collaborative advantage and firm performance, *J. Oper. Manag.* 29 (2011) 163–180.
- CAPORIN, M.; CHANG, C.; MCALEER, M. Are the S&P 500 Index and Crude Oil, Natural Gas and Ethanol Futures Related for Intra-Day Data? Tinbergen Institute Discussion Paper, 2016.
- CAPORIN, M.; MCALEER, M. Do we really need both BEKK and DCC? A tale of two multivariate GARCH models. *Journal of Economic Surveys*, v. 26, n. 4, p. 736-751, 2012.
- CAPORIN, M.; MCALEER, M. Scalar BEKK and indirect DCC. *Journal of Forecasting*, v. 27, n. 6, p. 537-549, 2008.
- CARNERO, M. A.; PEÑA, D.; RUIZ, E. Persistence and kurtosis in GARCH and stochastic volatility models. *Journal of Financial Econometrics*, v. 2, n. 2, p. 319-342, 2004.
- CHAN, F.; MCALEER, M. Estimating smooth transition autoregressive models with GARCH errors in the presence of extreme observations and outliers. *Applied Financial Economics*, v. 13, n. 8, p. 581-592, 2003.

CHANDRASEKARAN; RAGHURAM, (2014). *Agribusiness Supply Chain Management*. Taylor & Francis Group. hardcover. New. pp. 512.

CHIB, S.; NARDARI, F.; SHEPHARD, N. Analysis of high dimensional multivariate stochastic volatility models. *Journal of Econometrics*, v. 134, n. 2, p. 341-371, 2006.

CHRISTIE, A. The stochastic behavior of common stock variances: Value, leverage and interest rate effects. *Journal of financial Economics*, v. 10, n. 4, p. 407-432, 1982.

CONAB. Companhia Nacional de Abastecimento. Cana-de-Açúcar: Safra 2021/2022. On-line. Disponível em: <<http://www.conab.gov.br>>. Acesso em 15 dez. 2022.

DE SANTIS, G.; GERARD, B. How big is the premium for currency risk? *Journal of Financial Economics*, v. 49, n. 3, p. 375-412, 1998.

DICKEY, D. A.; FULLER, W. A. Distribution of the estimators for autoregressive time series with a unit root. *Journal of the American statistical association*, v. 74, n. 366a, p. 427-431, 1979.

DICKEY, D. A.; FULLER, W. A. Likelihood ratio statistics for autoregressive time series with a unit root. *Econometrica: Journal of the Econometric Society*, p. 1057-1072, 1981.

ENDERS, W. *Applied econometric time series*. John Wiley & Sons, 2014.

ENGLE, R. F. Autoregressive conditional heteroscedasticity with estimates of the variance of United Kingdom inflation. *Econometrica: Journal of the Econometric Society*, p. 987-1007, 1982.

ENGLE, R. F.; KRONER, Kenneth F. Multivariate simultaneous generalized ARCH. *Econometric theory*, v. 11, n. 01, p. 122-150, 1995.

ENGLE, R. F.; NG, Victor K. Measuring and testing the impact of news on volatility. *The journal of finance*, v. 48, n. 5, p. 1749-1778, 1993.

ENGLE, R. Dynamic conditional correlation: A simple class of multivariate generalized autoregressive conditional heteroskedasticity models. *Journal of Business & Economic Statistics*, v. 20, n. 3, p. 339-350, 2002.

ENGLE, R. GARCH 101: The use of ARCH/GARCH models in applied econometrics. *The Journal of Economic Perspectives*, v. 15, n. 4, p. 157-168, 2001.

FAMA, E. F. The behavior of stock market prices. *Journal of Business* 38, 34-105, 1965.

FIGUEIREDO, K. F.; FLEURY, P. F.; WANKE, P. Logística e gerenciamento da cadeia de suprimentos: planejamento do fluxo de produtos e dos recursos. São Paulo: Editora Atlas, 2003. 483 p.

FORRESTER, J. W. Industrial dynamics. New York: John Wiley & Sons, 1961.

FRANCO, C.; ZAKOIAN, J. GARCH models: structure, statistical inference and financial applications. John Wiley & Sons, 2010.

GIOT, P.; LAURENT, S. Modelling daily value-at-risk using realized volatility and ARCH type models. *Journal of Empirical Finance*, v. 11, n. 3, p. 379-398, 2004.

GIOT, P.; LAURENT, S. Value-at-risk for long and short trading positions. *Journal of Applied Econometrics*, v. 18, n. 6, p. 641-663, 2003.

GLOSTEN, L. R.; JAGANNATHAN, R.; RUNKLE, D. E. On the relation between the expected value and the volatility of the nominal excess return on stocks. *The Journal of Finance*, v. 48, n. 5, p. 1779-1801, 1993.

GOURIÉROUX, C. ARCH models and financial applications. Springer Science & Business Media, 1997.

HAFNER, C. M.; HERWARTZ, H. Structural analysis of portfolio risk using beta impulse response functions. *Statistica Neerlandica*, v. 52, n. 3, p. 336-355, 1998.

HAFNER, C. M.; HERWARTZ, H. Testing for causality in variance using multivariate GARCH models. Economics working paper/Christian-Albrechts-Universität Kiel, Department of Economics, 2004.

HULL, J. Risk Management and Financial Institutions, Web Site. John Wiley & Sons, 2012.

HULL, J.; WHITE, A. The pricing of options on assets with stochastic volatilities. *The Journal of Finance*, v. 42, n. 2, p. 281-300, 1987.

JOHNSON, R. A.; KAST, F. E.; ROSENWEIG, J. E. The theory and management of systems. New York, International Student Edition, Mc Graw-Hill, 1963.

KANG, S. H.; YOON, S. Modeling and forecasting the volatility of petroleum futures prices. *Energy Economics*, v. 36, p. 354-362, 2013.

KIM, S.; SHEPHARD, N.; CHIB, S. Stochastic volatility: likelihood inference and comparison with ARCH models. *The Review of Economic Studies*, v. 65, n. 3, p. 361-393, 1998.

KRONER, K. F.; VICTOR, K. Modeling asymmetric comovements of asset returns. *Review of Financial Studies*, v. 11, n. 4, p. 817-844, 1998.

KUESTER, K.; MITTNIK, S.; PAOLELLA, M. S. Value-at-risk prediction: A comparison of alternative strategies. *Journal of Financial Econometrics*, v. 4, n. 1, p. 53-89, 2006.

KURAMOTO, T. *Chemical Oscillations, Waves, and Turbulence*, Springer, Berlin, 1984.

KWIATKOWSKI, D. Testing the null hypothesis of stationarity against the alternative of a unit root: How sure are we that economic time series have a unit root. *Journal of econometrics*, v. 54, n. 1-3, p. 159-178, 1992.

LAMBERT, M.; STOCK, R.; VANTINE, J. *Administração estratégica da logística*. São Paulo: Brasil graphics, 1999. 912p.

LIEN, D.; KUEN, T. Some recent developments in futures hedging. *Journal of Economic Surveys*, v. 16, n. 3, p. 357-396, 2002.

LONGIN, F.; SOLNIK, B. Is the correlation in international equity returns constant: 1960–1990. *Journal of international money and finance*, v. 14, n. 1, p. 3-26, 1995.

MALMSTEN, H. Stylized facts of financial time series and three popular models of volatility. SSE/EFI Working Paper Series in Economics and Finance, Stockholm School of Economics, v. 563, 2004.

MANDELBROT, B. The variation of certain speculative prices. *Journal of Business* 36, 394–419, 1963

MANGANELLI, S.; ENGLE, F. *Value at risk models in finance*. Frankfurt am Main: European Central Bank, 2001.

MCALEER, M. Automated inference and learning in modeling financial volatility. *Econometric Theory*, v. 21, n. 01, p. 232-261, 2005.

NELSON, B. Conditional heteroskedasticity in asset returns: A new approach. *Econometrica: Journal of the Econometric Society*, p. 347-370, 1991.

NOGUEIRA, L. A. H., *Biocombustíveis líquidos*, Nota Técnica para a União da Indústria de Cana-de-açúcar, Instituto de Recursos Naturais, Universidade Federal de Itajubá – Unifei, setembro de 2009.

OLIVEIRA, D. P. R. *Sistemas, Organização e Métodos*. São Paulo: Atlas, 2001.

ONO, T. *Toyota Production System: Beyond Large-Scale Production*, Productivity Press, Portland, OR, 1988.

OSIPOV, G. V.; KURTHS, C. Zhou, Synchronization in Oscillatory Networks, Springer, Berlin, 2007.

PLOWMAN, E. G., Lectures on Elements of Business Logistics (Stanford Transportation Series), Graduate School of Business, Stanford University, Stanford, 1964.

POON, S.; GRANGER, C. Forecasting volatility in financial markets: A review. *Journal of economic literature*, v. 41, n. 2, p. 478-539, 2003.

POON, S.; GRANGER, C. Practical issues in forecasting volatility. *Financial Analysts Journal*, v. 61, n. 1, p. 45-56, 2005.

RAMCHAND, L.; SUSMEL, R. Volatility and cross correlation across major stock markets. *Journal of Empirical Finance*, v. 5, n. 4, p. 397-416, 1998.

RODRIGUE, J. P.; SLACK, B.; COMTOIS, C. 2001. in Brewer, A.M., Button, K.J. e Hensher, D.A. (eds) "The Handbook of Logistics and Supply-Chain Management", *Handbooks in Transport*. 2nd Ed. London:Pergamon/Elsevier.

SALVO, A.; HUSE, C. Build it, but will they come? Evidence from consumer choice between gasoline and sugarcane ethanol. *Journal of Environmental Economics and Management*. Available online 6 May 2013.

SANTOS, A.; NOGALES, F. J.; RUIZ, E. Comparing univariate and multivariate models to forecast portfolio value-at-risk. *Journal of financial econometrics*, v. 11, n. 2, p. 400-441, 2013.

SATCHELL, S.; KNIGHT, J. Forecasting volatility in the financial markets. Butterworth-Heinemann, 2007.

SENGE, P. M. A quinta disciplina – arte, teoria e prática da organização de aprendizagem. São Paulo: Best Seller, 1990.

SHARPE, W. F. Capital asset prices: A theory of market equilibrium under conditions of risk. *The journal of finance*, v. 19, n. 3, p. 425-442, 1964.

SHEPHARD, N.; ANDERSEN, T. G. Stochastic volatility: origins and overview. Springer Berlin Heidelberg, 2009.

SILVENNOINEN, A.; TERÄSVIRTA, T. Multivariate GARCH models. In: *Handbook of financial time series*. Springer Berlin Heidelberg, p. 201-229, 2009.

SILVENNOINEN, A.; TERÄSVIRTA, T. Multivariate GARCH models. SSE. EFI Working Paper Series in Economics and Finance, 2008.

SIMATUPANG, T.M.; SRIDHARAN, R. The Collaborative Supply Chain, *Int. J. Logist. Manag.* 13 (2002) 15–30.

SORIANO, P.; CLIMENT, F. J. Volatility transmission models: a survey. Available at SSRN 676469, 2005.

SOUSA, F. J. R., (2009). Petróleo e seus derivados, Nota Técnica para a União da Indústria de Cana-de-açúcar. Núcleo Interdisciplinar de Planejamento Energético (Nipe), Universidade Estadual de Campinas – Unicamp, Campinas, SP.

STERMAN, J. *Business dynamics: systems thinking and modelling for a complex world.* Boston, MA: Irwin McGraw-Hill, 2000.

STEVENS, G.C. Integrating the Supply Chain, *Int. J. Phys. Distrib. Logist. Manag.* 19 (1989) 3–8.

TAYLOR, S. J. Financial returns modelled by the product of two stochastic processes, a study of daily sugar prices 1961-79, in O. D. Anderson (ed.), *Time Series Analysis: Theory and Practice 1*, North-Holland, Amsterdam, pp. 203–226, 1982.

TAYLOR, S. Modeling stochastic volatility: A review and comparative study. *Mathematical finance*, v. 4, n. 2, p. 183-204, 1994.

TERRELL, D.; FOMBY, T. *Econometric analysis of financial and economic time series.* Emerald Group Publishing, 2006.

TSAY, R. S. *Multivariate Time Series Analysis: With R and Financial Applications.* John Wiley & Sons, 2013.

TSE, Y. K.; TSUI, A. A multivariate generalized autoregressive conditional heteroscedasticity model with time-varying correlations. *Journal of Business & Economic Statistics*, v. 20, n. 3, p. 351-362, 2002.

UNICA. (2014). Relatório final da safra 2013/2014. Disponível em: <<http://www.unicadata.com.br/>>. Acesso em 25 set. 2015.

VAN DER VORST, J. G. A. J., 2000. Effective food supply chains: generating, modelling and evaluating supply chain scenarios. Proefschrift Wageningen <http://www.library.wur.nl/wda/dissertations/dis2841.pdf>.

VAN DER VORST, J. G. A. J., BEULENS, A. J. M. AND VAN BEEK, P. Innovations in coordination and ICT in food supply chain networks. In: Jongen, W. M. F. and Meulenberg, M. T. G. eds. *Innovation in agrifood systems: product quality and consumer acceptance.* Wageningen Academic Publishers, Wageningen, 245-292, 2005.

WANKE, P. F.; ZINN, W. Strategic organization decision making. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, Amsterdam, v. 34, n. 6, p. 466-478, 2004.

WIENDAHL, H. H. Zentralistische Planung in dezentralen Strukturen? – Orientierungshilfen für die Praxis. In E. Westkämper & R. D. Schraft, eds. *Auftrags- und Informationsmanagement in Produktionsnetzwerken – Konzepte und Erfahrungsberichte*. Stuttgart: Fraunhofer IPA, pp. 79–107, 1998.

ZAKOIAN, J. Threshold heteroskedastic models. *Journal of Economic Dynamics and control*, v. 18, n. 5, p. 931-955, 1994.

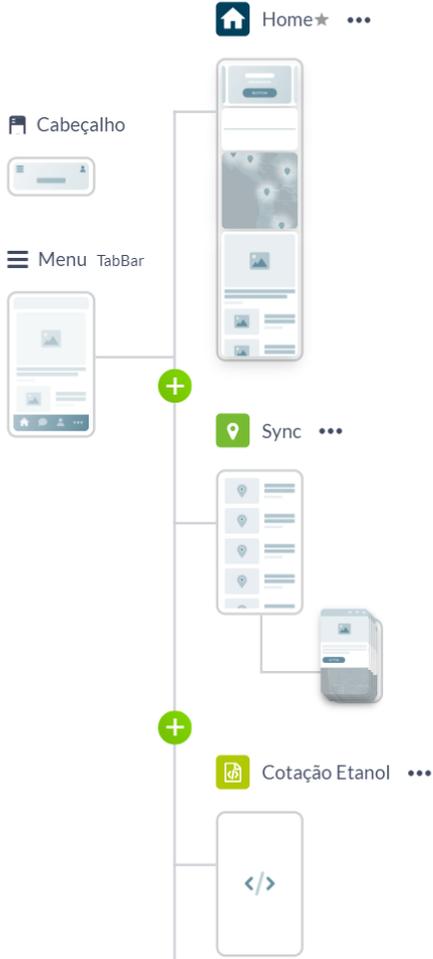
ZIVOT, E. Practical issues in the analysis of univariate GARCH models. In: *Handbook of financial time series*. Springer Berlin Heidelberg, p. 113-155, 2009.

ANEXO A – PAINEL DE CONTROLE DO MODELO

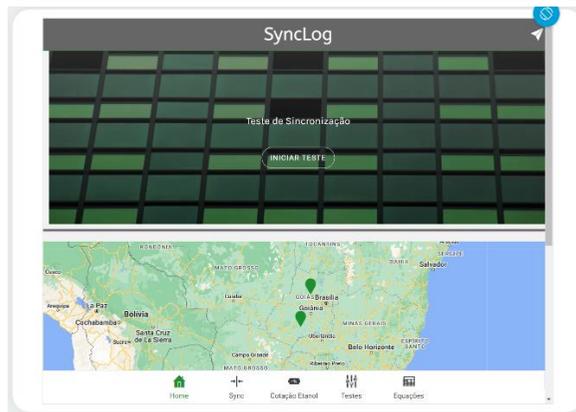
STELLA 10.0 - Untitled
File Edit View Interface Run Help

Variable	Eficiência	TCH	T deslocamento Tras	Velocidade
C1	0.54	102	14	5
C2	0.56	109	9	5
C3	0.63	99	7	5
C4	0.48	80	6	7
C5	0.63	106	9	5

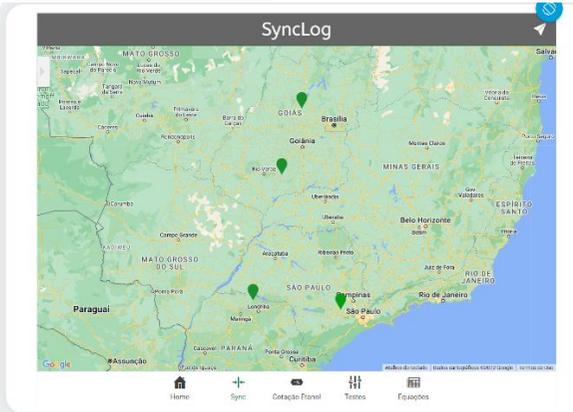
ANEXO B – APLICATIVO E ESTRUTURA DE TELAS



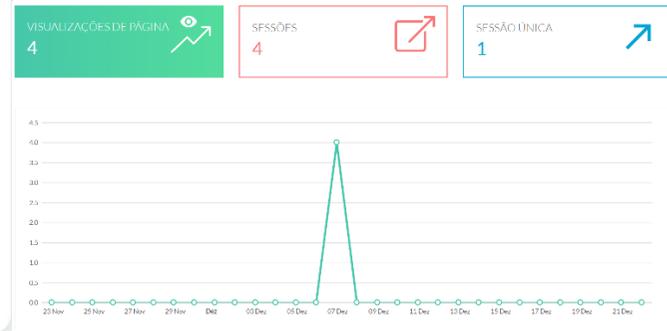
Passo 1 – Acessar o link: <https://synclog.meuappib.com/>



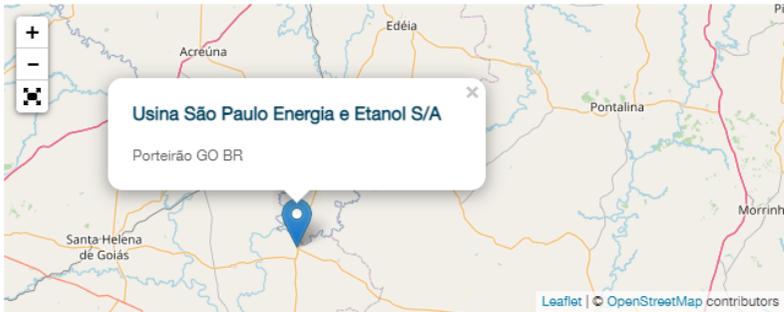
Passo 2 – Clicar em Sync



Passo 3 – Escolher região e acessar painel



ANEXO C - APLICATIVO - PAINEL DE GERENCIAMENTO LOCALIZAÇÃO E TEMPO DE VEÍCULO



+ Adicionar um elemento

B *I* U | | | | Format | | Source

+ Adicionar um elemento

ANEXO D - EQUAÇÕES DO MODELO (REPLICABILIDADE DO MODELO)

Carregamento_F1(t) = Carregamento_F1(t - dt) + (fluxo_carretão_F1 - fluxo_deslocamento_F1) * dt
INIT Carregamento_F1 = 0
COOK TIME = Tempo_saida_carretão_F1
CAPACITY = 60
FILL TIME = INF
INFLOWS:
fluxo_carretão_F1 = QUEUE OUTFLOW
OUTFLOWS:
fluxo_deslocamento_F1 = CONVEYOR OUTFLOW
Deslocamento_cana_campo_F1(t) = Deslocamento_cana_campo_F1(t - dt) + (fluxo_deslocamento_F1 - Fluxo_cana_campo_F1) * dt
INIT Deslocamento_cana_campo_F1 = 0
TRANSIT TIME = T_desl_cana_campo_F1
CAPACITY =
INFLOW LIMIT =
INFLOWS:
fluxo_deslocamento_F1 = CONVEYOR OUTFLOW
OUTFLOWS:
Fluxo_cana_campo_F1 = CONVEYOR OUTFLOW
Estoque_cana_campo_F1(t) = Estoque_cana_campo_F1(t - dt) + (Fluxo_cana_campo_F1 - Enchimento_caminhão_F1) * dt
INIT Estoque_cana_campo_F1 = 0
ELSE 0
Estoque_cana_F1(t) = Estoque_cana_F1(t - dt) + (Enchimento_caminhão_F1) * dt
INIT Estoque_cana_F1 = 0
INFLOWS:
Enchimento_caminhão_F1 = IF Estoque_cana_campo_F1 > Peso_Carga THEN Peso_Carga
ELSE 0
Estoque_de_caminhões_F1(t) = Estoque_de_caminhões_F1(t - dt) + (Caminhões_F1) * dt
INIT Estoque_de_caminhões_F1 = 0
INFLOWS:
Caminhões_F1 = Saída_Caminhão_F1
Fila_carregamento_F1(t) = Fila_carregamento_F1(t - dt) + (Fluxo_carregamento_F1 + Fluxo_carregamento_C2 + Fluxo_Carregamento_C3 + Fluxo_Carregamento_C4 - fluxo_carretão_F1) * dt
INIT Fila_carregamento_F1 = 0
DOCUMENT: Esse estoque corresponde a
INFLOWS:
Fluxo_carregamento_F1 = CONVEYOR OUTFLOW
Fluxo_carregamento_C2 = CONVEYOR OUTFLOW

```

Fluxo_Carregamento_C3 = CONVEYOR OUTFLOW
Fluxo_Carregamento_C4 = CONVEYOR OUTFLOW
OUTFLOWS:
fluxo_carretão_F1 = QUEUE OUTFLOW
Transbordo_C1(t) = Transbordo_C1(t - dt) + (Cap_corte_C1 - Fluxo_carregamento_F1) * dt
INIT Transbordo_C1 = 0
COOK TIME = T_deslocamento_Trans_C1 {minutos}
CAPACITY = 20
FILL TIME = INF
INFLOWS:
Cap_corte_C1 = C1*(((Velocidade_C1*TCH_C1*1*1.5)/80)/60)*Eficiência_C1
OUTFLOWS:
Fluxo_carregamento_F1 = CONVEYOR OUTFLOW
Transbordo_C2(t) = Transbordo_C2(t - dt) + (Cap_corte_C2 - Fluxo_carregamento_C2) * dt
INIT Transbordo_C2 = 0
COOK TIME = T_deslocamento_Tras_C2 {minutos}
CAPACITY = 20
FILL TIME = INF
INFLOWS:
Cap_corte_C2 = C2*(((Velocidade_C2*TCH_C2*1*1.5)/10)/60)*Eficiência_C2
OUTFLOWS:
Fluxo_carregamento_C2 = CONVEYOR OUTFLOW
Transbordo_C3(t) = Transbordo_C3(t - dt) + (Cap_corte_C3 - Fluxo_Carregamento_C3) * dt
INIT Transbordo_C3 = 0
COOK TIME = T_deslocamento_Tras_C3 {minutos}
CAPACITY = 20
FILL TIME = INF
INFLOWS:
Cap_corte_C3 = C3*(((Velocidade_C3*TCH_C3*1*1.8)/10)/70)*Eficiência_C3
OUTFLOWS:
Fluxo_Carregamento_C3 = CONVEYOR OUTFLOW
Transbordo_C4(t) = Transbordo_C4(t - dt) + (Cap_corte_C4 - Fluxo_Carregamento_C4) * dt
INIT Transbordo_C4 = 0
COOK TIME = T_deslocamento_Tras_C4 {minutos}
CAPACITY = 20
FILL TIME = INF
Tempo_saida_carretão_F1 = 2
T_deslocamento_Trans_C1 = 15 {minutos}
T_deslocamento_Tras_C2 = 15
T_deslocamento_Tras_C3 = 15
T_deslocamento_Tras_C4 = 15
T_desl_cana_campo_F1 = 10

```

```

Velocidade_C1 = 5 {km/hora}
Frente_de_Corte_2 =
Carregamento_F2(t) = Carregamento_F2(t - dt) + (fluxo_carretão_F2 - fluxo_deslocamento_F2) * dt
INIT Carregamento_F2 = 0
COOK TIME = Tempo_saida_carretão_F2
CAPACITY = 60
FILL TIME = INF
INFLOWS:
fluxo_carretão_F2 = QUEUE OUTFLOW
OUTFLOWS:
fluxo_deslocamento_F2 = CONVEYOR OUTFLOW
Deslocamento_cana_campo_F2(t) = Deslocamento_cana_campo_F2(t - dt) + (fluxo_deslocamento_F2 -
Fluxo_cana_campo_F2) * dt
INIT Deslocamento_cana_campo_F2 = 0
TRANSIT TIME = T_desl_cana_campo_F2
CAPACITY =
INFLOW LIMIT =
INFLOWS:
fluxo_deslocamento_F2 = CONVEYOR OUTFLOW
OUTFLOWS:
Fluxo_cana_campo_F2 = CONVEYOR OUTFLOW
Estoque_cana_campo_F2(t) = Estoque_cana_campo_F2(t - dt) + (Fluxo_cana_campo_F2 -
Enchimento_caminhão_F2) * dt
INIT Estoque_cana_campo_F2 = 0
INFLOWS:
Fluxo_cana_campo_F2 = CONVEYOR OUTFLOW
OUTFLOWS:
Enchimento_caminhão_F2 = IF Estoque_cana_campo_F2 > Peso_Carga THEN Peso_Carga
ELSE 0
Estoque_cana_F2(t) = Estoque_cana_F2(t - dt) + (Enchimento_caminhão_F2) * dt
INIT Estoque_cana_F2 = 0
INFLOWS:
Enchimento_caminhão_F2 = IF Estoque_cana_campo_F2 > Peso_Carga THEN Peso_Carga
ELSE 0
Estoque_de_caminhões_F2(t) = Estoque_de_caminhões_F2(t - dt) + (Caminhões_F2) * dt
INIT Estoque_de_caminhões_F2 = 0
INFLOWS:
Caminhões_F2 = Saída_Caminhão_F2
Fila_carregamento_F2(t) = Fila_carregamento_F2(t - dt) + (Fluxo_carregamento_F2 +
Fluxo_carregamento_C6 + Fluxo_Carregamento_C7 + Fluxo_Carregamento_C8 - fluxo_carretão_F2) * dt
INIT Fila_carregamento_F2 = 0
INFLOWS:

```

Fluxo_carregamento_F2 = CONVEYOR OUTFLOW
 Fluxo_carregamento_C6 = CONVEYOR OUTFLOW
 Fluxo_Carregamento_C7 = CONVEYOR OUTFLOW
 Fluxo_Carregamento_C8 = CONVEYOR OUTFLOW
 OUTFLOWS:
 fluxo_carretão_F2 = QUEUE OUTFLOW
 $Transbordo_C5(t) = Transbordo_C5(t - dt) + (Cap_corte_C5 - Fluxo_carregamento_F2) * dt$
 INIT Transbordo_C5 = 0
 COOK TIME = T_deslocamento_Trans_C5
 CAPACITY = 20
 FILL TIME = INF
 INFLOWS:
 $Cap_corte_C5 = C5 * (((((Velocidade_C5 * TCH_C5 * 1 * 1.5) / 10) / 60)) * Efici\^encia_C5)$
 OUTFLOWS:
 Fluxo_carregamento_F2 = CONVEYOR OUTFLOW
 $Transbordo_C6(t) = Transbordo_C6(t - dt) + (Cap_corte_C6 - Fluxo_carregamento_C6) * dt$
 INIT Transbordo_C6 = 0
 COOK TIME = T_deslocamento_Tras_C6
 CAPACITY = 20
 FILL TIME = INF
 INFLOWS:
 $Cap_corte_C6 = C6 * (((((Velocidade_C6 * TCH_C6 * 1 * 1.5) / 10) / 60)) * Efici\^encia_C6)$
 OUTFLOWS:
 Fluxo_carregamento_C6 = CONVEYOR OUTFLOW
 $Transbordo_C7(t) = Transbordo_C7(t - dt) + (Cap_corte_C7 - Fluxo_Carregamento_C7) * dt$
 INIT Transbordo_C7 = 0
 COOK TIME = T_deslocamento_Tras_C7
 CAPACITY = 20
 FILL TIME = INF
 INFLOWS:
 $Cap_corte_C7 = C7 * (((((Velocidade_C7 * TCH_C7 * 1 * 1.5) / 10) / 60)) * Efici\^encia_C7)$
 OUTFLOWS:
 Fluxo_Carregamento_C7 = CONVEYOR OUTFLOW
 $Transbordo_C8(t) = Transbordo_C8(t - dt) + (Cap_corte_C8 - Fluxo_Carregamento_C8) * dt$
 INIT Transbordo_C8 = 0
 COOK TIME = T_deslocamento_Tras_C8
 CAPACITY = 20
 FILL TIME = INF
 INFLOWS:
 $Cap_corte_C8 = C8 * (((((Velocidade_C8 * TCH_C8 * 1 * 1.5) / 10) / 60)) * Efici\^encia_C8)$
 OUTFLOWS:
 Fluxo_Carregamento_C8 = CONVEYOR OUTFLOW