

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
FACULDADE DE ENGENHARIA AGRÍCOLA**

**SISTEMA DE MEDIÇÃO DE FLUXO DE CANA-DE-AÇÚCAR EM COLHEDORAS  
PARA A GERAÇÃO DE MAPAS DE PRODUTIVIDADE**

**Natasha Biagi Pagnano**

Campinas, dezembro de 2001

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
FACULDADE DE ENGENHARIA AGRÍCOLA**

**SISTEMA DE MEDIÇÃO DE FLUXO DE CANA-DE-AÇÚCAR EM COLHEDORAS  
PARA A GERAÇÃO DE MAPAS DE PRODUTIVIDADE**

Tese apresentada à Faculdade de  
Engenharia Agrícola da UNICAMP  
como requisito para a obtenção do título  
de Doutora em Engenharia Agrícola.

**Natasha Biagi Pagnano**

**Orientador: Paulo Sérgio Graziano Magalhães**

Campinas, dezembro de 2001

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

P148s Pagnano, Natasha Biagi  
Sistema de medição de fluxo de cana-de-açúcar em  
colhedoras para a geração de mapas de produtividade /  
Natasha Biagi Pagnano. --Campinas, SP: [s.n.], 2001.

Orientador: Paulo Sérgio Graziano Magalhães  
Tese (doutorado) - Universidade Estadual de  
Campinas, Faculdade de Engenharia Agrícola.

1. Cana-de-açúcar. 2. Agricultura - mapas. 3.  
Máquinas agrícolas. I. Magalhães, Paulo Sérgio Graziano.  
II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de  
Engenharia Agrícola. III. Título.

*“Creio que o triunfo é resultado de esforço inteligente, que não depende de sorte, de magia, de amigos.(...) não diminuirei meu trabalho, por ver que os outros o fazem, prestarei o melhor serviço de que sou capaz, porque jurei a mim mesmo triunfar na vida, e sei que o triunfo é sempre resultado do esforço consciente e eficaz.”*

**Mahatma Gandhi**

## AGRADECIMENTOS

À Deus por toda saúde e bênção que nos dá diariamente;  
Aos meus pais, Rubens e Neide, pelo amor, exemplo, suporte e incentivo à minha formação;  
Ao Américo pelo carinho, dedicação e apoio;  
Aos meus irmãos Rubinho e Giovanna pelo carinho, amizade e estímulo;  
Às minhas sobrinhas Marcella e Rafaella e ao Augusto pelo carinho e alegria;  
Aos meus avós Edith (*in memorian*), Edgard (*in memorian*), Alcinda (*in memorian*) e Domingos (*in memorian*) que muito contribuíram em meu crescimento como ser humano;  
Ao Prof. Dr. João Domingos Biagi, por suas sugestões, conselhos e apoio a minha formação;  
À Faculdade de Engenharia Agrícola da Universidade Estadual de Campinas (FEAGRI), por me receber e acolher para que eu pudesse aumentar meus conhecimentos técnicos, científicos e sociais;  
À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) pelo apoio financeiro durante todo o andamento do trabalho;  
Ao Prof. Dr. Paulo Sérgio Graziano Magalhães que muito me ajudou com seus conhecimentos e dedicação;  
Ao Prof. Dr. Nelson Luis Cappelli e ao Eng. Cláudio Umezu, pelo suporte técnico;  
Aos colegas e amigos, alunos e funcionários da FEAGRI, principalmente, José Maria, Luís, Edgar, Silvia e Roberto Carlos (Fubá), pela ajuda e apoio sempre demonstrados;  
À COPERSUCAR, em especial ao Eng. Jorge Neves, ao Eng. Marcelo Pierossi e aos técnicos Joãozinho e Airton pelo suporte técnico nos ensaios de campo, pelo empréstimo da carreta instrumentada e pelo contato com as usinas envolvidas;  
À Usina Santa Adélia e à Usina Cresciunal por cederem a área e disponibilizarem suas colhedoras para os ensaios de campo;  
Enfim à todos que direta ou indiretamente contribuíram nas diversas etapas do trabalho.

# SUMÁRIO

<b>Lista de Figuras</b>	v
<b>Lista de Tabelas</b>	vii
<b>Resumo</b>	viii
<b>Abstract</b>	ix
<b>I - Introdução</b>	1
<b>II - Objetivos</b>	3
<b>III – Revisão Bibliográfica</b>	4
3.1 – <i>Introdução</i>	4
3.2 – <i>Global Positioning System (GPS)</i>	6
3.3 – <i>Agricultura de Precisão (AP)</i>	8
3.4 – <i>Sistemas de monitoramento de rendimento</i>	10
3.4.1 - Monitores de fluxo mássico por impacto	10
3.4.2 - Monitores de peso	11
3.4.3 - Monitores ópticos	11
3.4.4 - Monitores radioativos	12
3.4.5 - Sensores de velocidade e largura de corte	12
3.4.6 - Sensores de umidade	12
3.4.7 - Precisão dos monitores de rendimento	12
3.4.8 - Operadores de interface	13
3.5 - <i>Sistemas de medição da produtividade</i>	13
3.6 - <i>Máquinas para colheita de cana-de-açúcar</i>	17
3.7 – <i>Vantagens e Desvantagens do uso de agricultura de precisão na cultura de cana-de-açúcar</i>	19
3.8 – <i>Métodos usados para analisar dados de Agricultura de Precisão</i>	20
<b>IV – Material e Métodos</b>	23
4.1 – <i>Material</i>	23
4.2 – <i>Métodos</i>	24
4.2.1 – <i>Calibração das células de carga</i>	27
4.2.1.1 - <i>Estática</i>	27

4.2.1.2 – Dinâmica	27
4.2.1.3 – Calibração no campo	29
4.2.2 – Ensaios de Laboratório	30
4.2.3 – Ensaios de Campo	32
4.2.3.1 – Caracterização das áreas colhidas	35
4.2.4 – Análise dos dados dos ensaios de campo	37
4.2.4.1 – Filtragem dos sinais	37
4.2.4.2 – Análise dos dados	37
4.2.5 – Mapas de rendimento	37
<b>V – Resultados e Discussão</b>	<b>39</b>
5.1 – <i>Laboratório</i>	39
5.1.1 – Calibração das células de carga	39
5.1.1.1 - Estática	39
5.1.1.2 - Dinâmica	41
5.1.2 – Ensaios de laboratório	42
5.2 – <i>Ensaios realizados na Usina Santa Adélia</i>	45
5.3 – <i>Ensaios realizados na Usina Cresciumal</i>	51
<b>VI – Conclusões</b>	<b>57</b>
<b>VII – Sugestões para Trabalhos Futuros</b>	<b>58</b>
<b>VII - Referências Bibliográficas</b>	<b>59</b>
<b>Anexo 1</b> - VI do LabView para calibração estática das células de cargas	63
<b>Anexo 2</b> - Programa para aquisição de dados das quatro células de carga e do sensor magnético	64
<b>Anexo 3</b> - Programa para a análise dos dados	67

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1</b> – Gráfico da porcentagem do valor da produção agropecuária do Estado de São Paulo (Fonte: Secretaria de Agricultura e Abastecimento)	2
<b>Figura 2</b> - Máquina colhedora de grãos com equipamentos para mapear rendimento de cultura (Fonte: John Deere Co.)	5
<b>Figura 3</b> - Sistema de Correção Diferencial de GPS (Fonte: ROCHA, 1998)	7
<b>Figura 4</b> - Sistema de Correção Diferencial em Tempo Real (Fonte: ROCHA, 1998)	7
<b>Figura 5</b> – Carreta instrumentada, em colheita de beterraba (Fonte: EARL, 1996)	14
<b>Figura 6</b> – Dispositivos a serem adaptados à esteira de uma colhedora de beterraba (Fonte: WALTER <i>et al.</i> , 1996)	17
<b>Figura 7</b> – Configuração do equipamento de monitoramento de produtividade de beterraba e diagrama de conexão (Fonte: WALTER <i>et al.</i> , 1996)	17
<b>Figura 8</b> – Corte esquemático de uma colhedora de cana-de-açúcar (Fonte: Claas CC-3000)	18
<b>Figura 9</b> – Gráfico de semi-variâncias versus a distância (lags) entre os pontos usados para os valores calculados. (Fonte: MORGAN & ESS, 1997)	22
<b>Figura 10</b> – Esquema de colhedora com a localização do sistema para pesagem dos rebolos	24
<b>Figura 11</b> – Esquema de montagem das células de carga (vista lateral)	25
<b>Figura 12</b> – Acoplamento do transdutor na esteira de uma colhedora BRASTOFT A-7700	25
<b>Figura 13</b> – Calibração da balança montada na colhedora	29
<b>Figura 14</b> – Esquema de montagem das quatro células de carga	30
<b>Figura 15</b> - Etapas da análise dos dados feita pelo LabVIEW 5.1	32
<b>Figura 16</b> - Esquema da segunda configuração da balança com duas células de carga. (1) barra de fixação; (2) chapa de suporte; (3) célula de carga	33
<b>Figura 17</b> – Indicação do posicionamento da balança no elevador da colhedora	34
<b>Figura 18</b> - Detalhe externo e interno da fixação do sensor magnético no elevador da colhedora	34
<b>Figura 19</b> – Detalhe das condições do canavial do primeiro talhão colhido na Usina Santa Adélia	35
<b>Figura 20</b> – Colhedora e transbordo do primeiro talhão colhido	36
<b>Figura 21</b> – Colhedora e transbordo da COPERSUCAR do segundo talhão colhido	36
<b>Figura 22</b> – Colhedora e transbordo do talhão colhido na Usina Cresciunial	37
<b>Figura 23</b> – Espectro de frequência da vibração da esteira da colhedora CAMECO CHT2500B	39
<b>Figura 24</b> - Curvas de calibração das células de carga usadas no ensaio de laboratório	40
<b>Figura 25</b> – Curvas de calibração das células de carga utilizadas nos ensaios de campo	41
<b>Figura 26</b> - Gráfico da força aplicada (sinal de entrada) e da resposta do sistema (dados experimentais e ajustados do sinal de saída) para $F(t)$	42

<b>Figura 27</b> – Gráfico do espectro de frequência dos ruídos elétricos	42
<b>Figura 28</b> - Gráfico do espectro de frequência das vibrações mecânicas e dos ruídos	43
<b>Figura 29</b> - Sinais das quatro células de carga, em consequência da passagem de três pesos de aproximadamente 1,5 kg, filtrados a 7 Hz	44
<b>Figura 30</b> – Gráfico da soma dos sinais das quatro células de carga filtrados a 7 Hz	45
<b>Figura 31</b> – Sinal real e sinal filtrado sobrepostos, Butterworth de 2 <sup>a</sup> ordem	45
<b>Figura 32</b> – Colhedora em movimento, cortando cana e esteira parada	46
<b>Figura 33</b> – Colhedora em movimento, cortando cana e esteira em movimento	46
<b>Figura 34</b> – Sinal real (azul) e sinal filtrado (vermelho) do ensaio feito na primeira linha do primeiro talhão colhido	47
<b>Figura 35</b> – Sinal real e filtrado das células de cargas e sinal do sensor de proximidade de um ensaio	49
<b>Figura 36</b> – Semi-variograma com efeito pepita (nugget) = 29,2036	50
<b>Figura 37</b> - Mapa do primeiro talhão colhido na Usina Santa Adélia - dados reais rasterizados (unidades em kgf/m <sup>2</sup> )	50
<b>Figura 38</b> - Semi-variograma ajustado pelo modelo linear, onde $x = 0$ ; $y = 2,72992$ e o efeito pepita (nugget) = 45,379	52
<b>Figura 39</b> - Mapa do talhão colhido na Usina Cresciumsal – dados reais rasterizados (unidades em kgf/m <sup>2</sup> )- reclassificado	53
<b>Figura 40</b> – Mapa do talhão colhido na Usina Cresciumsal com Krigagem – corrigido pelo FC 0,69 (unidades em kgf/m <sup>2</sup> )	53
<b>Figura 41</b> – Mapa do talhão colhido na Usina Cresciumsal com Krigagem – corrigido pelo FC 0,69 – reclassificado	54
<b>Figura 42</b> - Mapa de contorno do talhão colhido na Usina Cresciumsal, baseado nos dados reais. Intervalos de classificação conforme Tabela 8	55
<b>Figura 43</b> – Mapa de contorno do talhão colhido na Usina Cresciumsal após a Krigagem. Intervalos de classificação conforme Tabela 8	55

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1</b> – Médias obtidas durante ensaios em laboratório, utilizando-se pesos fixos simulando fluxo contínuo	43
<b>Tabela 2</b> - Médias obtidas durante ensaios em laboratório, utilizando-se pesos cilíndricos	44
<b>Tabela 3</b> – Resultado por linha medido pelo sistema automático de medição do primeiro talhão colhido	47
<b>Tabela 4</b> – Resultado da pesagem dos caminhões e das carretas feita na usina	48
<b>Tabela 5</b> – Resultado registrado pelo caminhão da COPERSUCAR e pelo sistema automático de medição	58
<b>Tabela 6</b> – Resultado registrado pela Usina Cresciunal e pelo sistema automático de medição	51
<b>Tabela 7</b> - Resultado corrigido registrado pela Usina Cresciunal e pelo sistema automático de medição	52
<b>Tabela 8</b> - Valores da reclassificação	54
<b>Tabela 9</b> - Relação entre classe e área colhida do mapa Krigado da área colhida na Usina Cresciunal (Figura 41)	56

## RESUMO

Para a implementação da Agricultura de Precisão, que permite a aplicação de um sistema de gerenciamento eficiente, um dos requisitos básicos é a elaboração de mapas de produtividade. Este trabalho visa desenvolver um sistema automático de medição da produtividade de cana-de-açúcar quando colhida por colhedoras autopropelidas. O sistema utiliza células de carga como instrumento de determinação do peso da matéria-prima colhida e é capaz de mensurar o fluxo de rebolos que passa pela esteira antes de serem lançados ao veículo de transbordo, os quais, juntamente com as informações obtidas por um GPS instalado na colhedora, permitem a elaboração de um mapa digital que representa uma superfície de produção para a área colhida. Este sistema foi testado em laboratório e em campo nas safras de 2000 e 2001. O erro observado nos ensaios de laboratório oscilou entre um mínimo de 0,70% e um máximo de 2,71 % nos ensaios onde simulou-se uma massa constante, e de 0,35 % a 4,02 % nos ensaios onde utilizou-se a passagem de massas conhecidas sobre o elevador. Nos ensaios de campo feitos durante a safra de 2000 na Usina Santa Adélia, o sistema automático de medição (SAM) proposto apresentou, no primeiro talhão colhido, uma diferença de 12,5 % comparado à pesagem dos caminhões na usina. No segundo talhão, o erro do SAM, não pode ser avaliado em relação à massa medida pela usina, uma vez que houve perda de dados durante a colheita, mas pôde-se fazer uma análise linha a linha e compará-la às massas medidas por uma carreta instrumentada pertencente à COPERSUCAR. O erro apresentado ficou entre 0,38 % e 28,66 %, onde os maiores valores foram atribuídos a problemas operacionais, como por exemplo, início e término da aquisição no meio das linhas. Os ensaios realizados na Usina Cresciunal, na safra de 2001, apresentaram erro máximo de 5,08 % comparados aos caminhões pesados na usina. Portanto, concluiu-se que o sistema proposto atende às expectativas do projeto.

## ABSTRACT

In order to implementing precision farming, which makes possible an efficient management system, it is necessary to obtain yield maps. The research project described here aims to develop an automatic system to measure the sugarcane productivity when harvested by sugarcane harvesters. The system uses load cells transducers to determine the harvested material weight and it is able to measure the mass flow directly in real time. The recorded data added to the information provided from GPS will allow producing digital map, which represents the yield of the harvested area. This system was tested at laboratory and field. The error observed on laboratory tests varied among 0.70 % and 2.71 % in tests where a constant mass was simulated, and among 0.35 % and 4.02 % in tests where know masses passed through the conveyor. In field tests during the 2000 crop season, at Santa Adélia Mill, the automatic measure system (AMS) proposed presented, at first area harvested, an error of 12.5 % compared to the truck weight at the mill. At second area harvested, the AMS error could not be compared to the masses measure at the mill, but it was compared line by line with relation to an instrumented truck which belongs to COPERSUCAR. The presented error was among 0.38 % and 28.66 %, where the maximum values was due to operation problems like turn off and turn on the acquisition system at the middle of the line. The tests realized at Cresciunal Mill, during the 2001 crop season, showed a maximum error of 5.08 % compared with the trucks weighted at the mill. The system proposed was able to determine yield differences in the harvested area and accurate enough to be used for sugarcane Precision Agricultural management systems.

## I - INTRODUÇÃO

Antes da revolução industrial e do processo de mecanização da agricultura, os agricultores já eram capazes de reconhecer a variabilidade espacial de certas características físico-químicas e biológicas das áreas cultivadas. Até então o uso do trabalho braçal e/ou da tração animal permitia aos agricultores tratar áreas com menor ou maior fertilidade ou infestação por pragas e doenças de forma diferenciada. Com o advento da mecanização e da produção em larga escala, os campos cultivados passaram a ser tratados de forma uniforme. As taxas de aplicação de fertilizantes passaram a ser calculadas com base em valores médios de fertilidade e a aplicação feita uniformemente em toda a extensão do campo. Este tratamento uniforme pode gerar perdas econômicas para o agricultor e deixa o mesmo mais susceptível a causar danos ambientais, como por exemplo, a contaminação dos recursos hídricos da região, por causa do maior volume de fertilizantes ou defensivos químicos aplicado na área.

A agricultura de precisão (AP) que BLACKMORE (1994) descreve como um desenvolvimento tecnológico que incorpora novas técnicas e modifica as já existentes, para produzir um conjunto de ferramentas para aumentar a eficiência no gerenciamento da agricultura, promete reverter o quadro atual, permitindo a aplicação de insumos agrícolas nos locais corretos e nas quantidades requeridas. Essa nova tecnologia faz uso do GPS (*Global Positioning System*), permitindo a coleta automática de dados sobre a cultura ou a área em estudo georreferenciados. Colhedoras equipadas com antena GPS e sensores eletrônicos já são usadas para o mapeamento da colheita de cereais e alguns tubérculos, em diversos países industrializados, permitindo assim identificar áreas de maior ou menor produtividade.

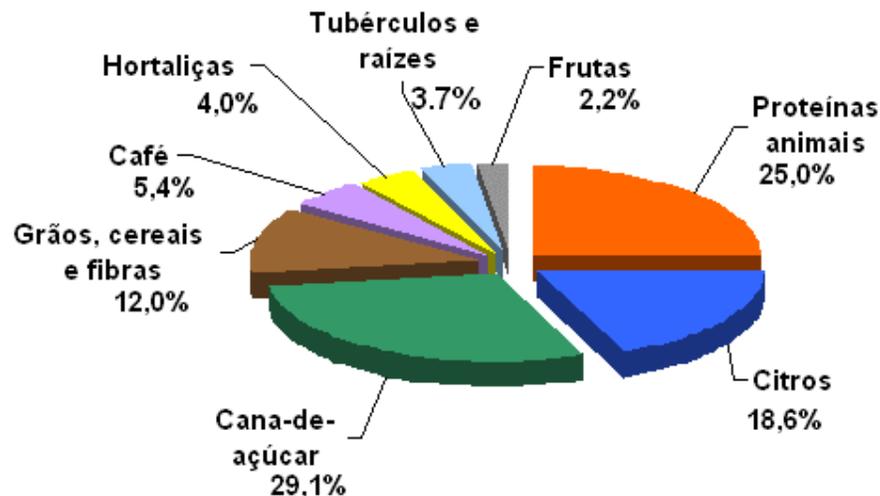
Estes mapas devem ser posteriormente analisados e associados com outros mapas, como por exemplo, mapas de solo e topografia, com o uso de aplicativos computacionais como SIG (Sistemas de Informação Geográfica) que são usados para o armazenamento, tratamento, análise e visualização da informação espacial coletada no campo. A análise dos dados permite otimizar o uso de insumos agrícolas e criar mapas de aplicação localizada que levam em consideração a variabilidade espacial encontrada no campo.

Grande parte das pesquisas realizadas nessa área estão concentradas no desenvolvimento de dosadores de corretivos e avaliadores de rendimento para culturas de grãos como trigo e soja, que são produtos cultivados em áreas subtropicais e

predominantemente em países desenvolvidos, onde pesquisas nessa linha são desenvolvidas há mais de oito anos, por institutos de pesquisas, universidades e companhias privadas.

A tendência do uso da eletrônica aliada à informática faz com que a aplicação deste novo conhecimento se estenda a novas culturas, como por exemplo a cana-de-açúcar, que no Brasil tem grande expressão econômica, com 4,2 milhões de hectares plantados onde 40% desta área é passível de mecanização (RIPOLI & OMETTO, 1996). A colheita mecanizada da cana-de-açúcar, iniciada nos anos 70, já atinge 20% dos canaviais do País e 25% dos quase 3 milhões de hectares plantados em São Paulo (COSTA, 2001).

Segundo a Secretaria de Agricultura e Abastecimento, na safra de 97/98, 29,1 % do valor da produção no Estado de São Paulo refere-se a cana-de-açúcar, como mostrado na Figura 1.



**Figura 1** – Gráfico da porcentagem do valor da produção agropecuária do Estado de São Paulo (Fonte: Secretaria da Agricultura e Abastecimento, 97/98).

Para implantar o uso da tecnologia de AP, na cultura de cana-de-açúcar, é necessário o estudo de um sistema de monitoramento de produção aliado à correta posição da máquina no campo com o uso de GPS, gerando mapas de rendimento, contribuindo para o controle e conseqüente economia dos produtos aplicados, reduzindo os riscos de poluição ambiental, diminuindo o custo de produção, e consolidando a liderança do país neste setor.

## **II – OBJETIVOS**

Observa-se que a cultura de cana-de-açúcar continua sendo uma das mais importantes atividades agrícolas do país e principalmente do Estado de São Paulo. Observa-se ainda que para a redução de custo de produção, uma das alternativas encontra-se no gerenciamento da produção que requer a aplicação de técnicas modernas para se tornar eficiente. Uma destas técnicas é a “Agricultura de Precisão - AP”.

Para a implementação da AP um dos requisitos é a elaboração do mapa de produtividade da cultura, a partir do qual, combinado com outras informações relevantes e utilizando-se de técnicas de “Sistemas de Informação Geográfica” é possível aplicar um sistema de gerenciamento eficiente.

Como uma maneira de contribuir para a evolução deste setor, este trabalho tem por objetivos específicos:

- projetar, dimensionar e construir um sistema capaz de medir a massa da cana-de-açúcar que está sendo colhida em tempo real;
- avaliar o desempenho deste dispositivo em funcionamento por meio de testes laboratoriais e de campo;
- gerar um mapa de rendimento da cultura de cana-de-açúcar.

### **III - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

#### **3.1 – Introdução**

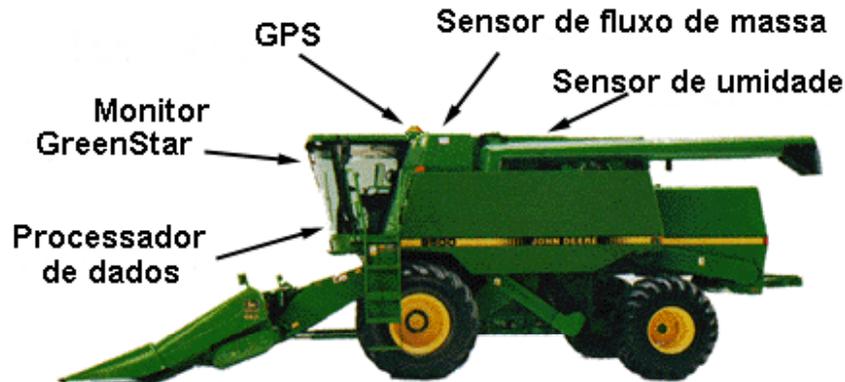
A globalização da economia e a competitividade de preço dos produtos têm direcionado o setor agrícola a buscar maior eficiência e melhor controle de informações em nível de campo. A pressão pela maior conservação dos recursos naturais e menor poluição do solo é outro fator a influenciar novas mentalidades na operacionalização do processo produtivo da agricultura.

Agricultura de precisão, segundo ROCHA (1998), é um termo usado para descrever a busca do crescimento em eficiência, por meio do gerenciamento localizado da agricultura, proporcionado pelo uso de tecnologia de geoprocessamento. Esta tecnologia auxilia na medição do rendimento, determinação das condições do solo e da cultura, estudo da topografia e de outras informações de cada parte do campo, associando-as a uma localização exata. Com os dados obtidos, gera-se um mapa no computador, permitindo que se veja claramente as relações entre vários fatores por meio da espacialização das variações de atributos ao longo da área.

SARFAS (1996), afirma que o aumento da população mundial faz com que os campos sejam mais produtivos e sem dúvida nenhuma, a aplicação de sensores aliada ao sistema de navegação por GPS será um importante fator para o aumento da produtividade dos campos de grãos mundiais. Ainda em seu trabalho, o autor apresenta algumas inovações tecnológicas como o uso de fibra óptica nos equipamentos agrícolas, o que até alguns anos era privilégio de poucos setores mais tecnificados.

Os trabalhos mais comuns apresentados sobre agricultura de precisão, estão na área de colheita de grãos, onde empresas como JOHN DEERE (1998) desenvolveram sensores para medição do desempenho de suas máquinas e dispositivos para auxiliar o operador nas tomadas de decisões. Suas máquinas colhedoras são produzidas com um sistema completo de monitoramento capaz de detectar o rendimento da cultura, com sensores de umidade, sensores de posicionamento, processador de mapas e um aplicativo computacional para geração de mapas de rendimento. Para as culturas de cereais, os sistemas de monitoramento para a agricultura de precisão encontram-se em estado avançado. A Figura 2 mostra uma máquina

colhedora de grãos típica com os equipamentos necessários para se mapear rendimento de cultura.



**Figura 2** - Máquina colhedora de grãos com equipamentos para mapear rendimento de cultura (Fonte: John Deere Co.).

Similarmente, a CASE (1999) desenvolveu um sistema de monitoramento de produção de grãos chamado AFS (*Advanced Farming Systems*), que conta com dois tipos de receptores, sendo que um deles faz automaticamente a conversão diferencial, um monitor de produtividade e umidade que armazena os dados em um cartão PCMCIA para posterior análise, e ainda um *software* para confecção de mapas de rendimento.

A Massey Ferguson, MF, (AGCO, 1998) começou o desenvolvimento de mapas de produtividade no começo dos anos 80, mas somente em 1991 é que foi lançado o primeiro sistema para esta função, o *Fieldstar*. Foram feitos vários ensaios com vários agricultores, e a experiência mostrou que a aplicação de insumos foi reduzida e a produtividade aumentou. Indicações destes testes mostraram a economia de £ 50,00 por hectare, com um potencial de duplicar isto no futuro. A MF recomenda a realização de mapas de produtividade por no mínimo 3 anos. Os agricultores confirmaram que as medidas de produtividade apresentavam erro de  $\pm 0,5\%$ . A posição acurada poderia ser melhorada no futuro se a necessidade da AP assim o exigisse. No sistema *Fieldstar* ambas as medições, produtividade e posicionamento, são registradas a cada 1,2 segundos, durante a colheita, fornecendo, neste caso, 785 pontos de referência por hectare. Isto poderia ser comparado com outros mapas, como o de propriedades de solo. Com o pacote *Fieldstar* instalado, o acesso às informações em outros computadores é facilitado. O sistema MF é acurado, amigável e totalmente automático, com nenhuma tarefa adicional complicada para o operador. As informações são transferidas para outros

computadores através de um cartão *Fieldstar* para a posterior realização de mapas de produtividade.

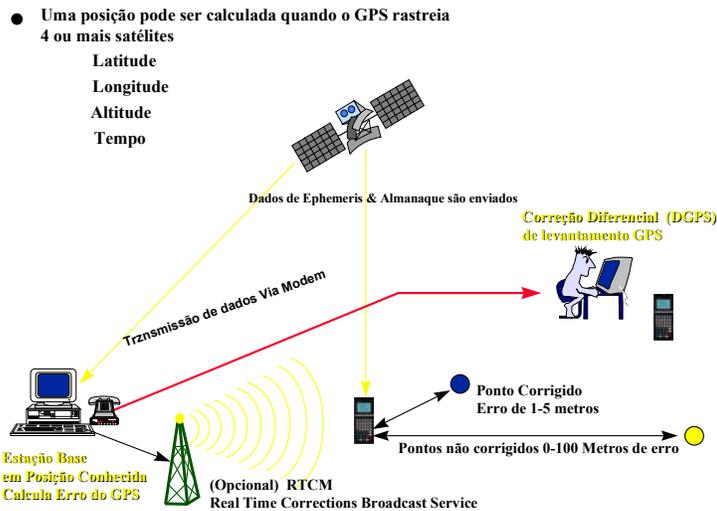
Uma das culturas de maior importância, no Brasil, é a de cana-de-açúcar. Segundo o SEADE, IBGE, o Estado de São Paulo foi, no ano de 2000, responsável por 48,5 % da cana-de-açúcar plantada no país com 2,82 milhões de ha, sendo a cultura que se encontra em primeiro lugar dentre as atividades deste Estado, onde são empregados 32,3 % da força de trabalho agrícola.

### 3.2 – Global Positioning System (GPS)

MORGAN & ESS (1997) explicam que o GPS fornece posições em três dimensões pelo uso de quatro ou mais satélites de um total de 24 satélites. O receptor mede o tempo que o sinal do satélite o atinge. Assumindo uma velocidade constante para as ondas de rádio, 300 km/s, o receptor calcula a distância de cada satélite, sendo usado quatro satélites no mínimo. Assim, o receptor localiza a posição corrente do satélite em um almanaque eletrônico (registro de posição ao longo do tempo). Se a localização e a distância do satélite são conhecidas, então a posição do receptor é conhecida, podendo estar em qualquer lugar da superfície de uma esfera centrada na posição do satélite com raio igual à distância calculada entre o satélite e o receptor. Este procedimento é repetido para cada satélite que o receptor rastreia e finalmente o receptor determina onde estas esferas se encontram no espaço, podendo determinar a posição do receptor GPS pela determinação do ponto de intersecção de quatro esferas ao redor de cada satélite.

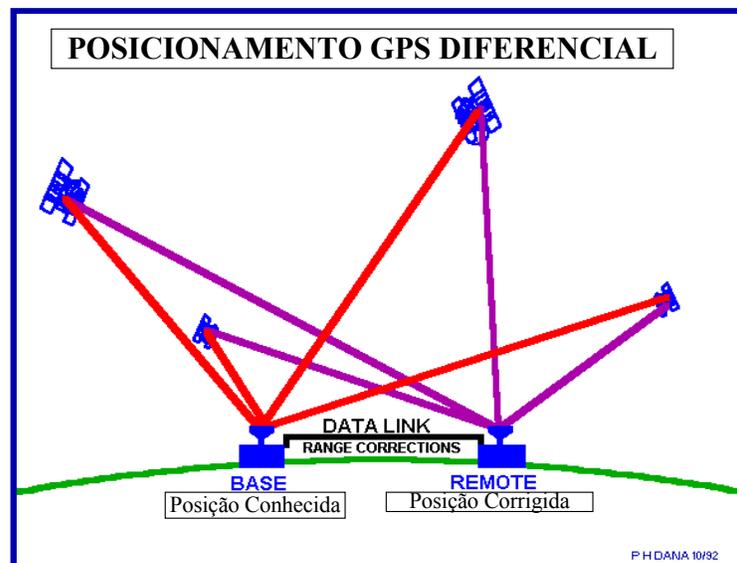
Segundo ROCHA (1998) o Departamento de Defesa dos Estados Unidos introduziu propositadamente um erro no sistema GPS, chamado Disponibilidade Seletiva (S.A.), supostamente por motivos de segurança. O erro modifica a precisão do sinal do satélite usando um código exclusivo, deslocando a posição em até 100 metros. Apesar disso, a precisão pode passar por uma correção, a partir da utilização de 2 aparelhos GPS, um deles em local fixo de posição conhecida, que calcula um fator de correção (vetor). A correção resultante é armazenada para uso posterior e comparada com os dados do receptor móvel, corrigindo-os. Opcionalmente estas correções podem ser enviadas via rádio, corrigindo os dados do receptor móvel em tempo real. Este tipo de correção reduz o erro para uma faixa de 1 a 5 metros. Este sistema de correção é chamado de correção diferencial (DGPS - *Differential Global Positioning System*) e é mostrado esquematicamente na Figura 3.

### Conceito Simplificado de Correção Diferencial



**Figura 3** - Sistema de Correção Diferencial de GPS (Fonte: ROCHA, 1998).

O erro introduzido pela Disponibilidade Seletiva (S.A.) não é continuamente o mesmo, mudando constantemente, portanto a correção é válida no período máximo de 15 segundos. Sistemas de alta qualidade de tempo real como o representado pela Figura 4, podem corrigir os dados numa taxa relativamente alta.



**Figura 4** - Sistema de Correção Diferencial em Tempo Real (Fonte: ROCHA, 1998).

Alguns sistemas de melhor qualidade usam programas computacionais sofisticados para prever as mudanças nas correções de dados, desde a última correção. Os sistemas de correção em tempo real são utilizados na agricultura de precisão para fornecer a posição da máquina agrícola a ser armazenada por sistemas coletores de dados. Estes erros, apontados por

ROCHA (1998) não existem mais, mas o uso do DGPS ainda é freqüente, pois consegue-se uma diminuição dos erros de aquisição do posicionamento dado pelo aparelho de GPS.

### **3.3 - Agricultura de Precisão (AP)**

Segundo STAFFORD & BOLAM (1996) a agricultura de precisão tem sua base no uso do GPS, com o qual o posicionamento da planta e da máquina é obtido com grande precisão, pelo uso de satélites. Esta precisão será utilizada na aplicação de produtos químicos em quantidade adequada e no local necessário, diminuindo gastos e impactos ambientais.

Ainda neste sentido, KORTE & YULE (1996) afirmam que durante os últimos anos, aumentou o interesse pela diminuição da quantidade de produtos aplicados nos campos. Isto é obtido pelo uso do GPS para a localização precisa das áreas e das máquinas no campo.

Para FEKETTE *et al.* (1996) o principal objetivo da agricultura de precisão é otimizar a aplicação de corretivos químicos sobre as culturas com o conhecimento das necessidades da cultura ponto a ponto. BILLER & SOMMER (1996) afirmam que o controle de produtos químicos será de grande importância em um futuro próximo. Segundo os autores, os dispositivos mecânicos avaliados atualmente não apresentam grande precisão de dosagem, podendo ser melhorados por meio de sensores ópticos que detectem os problemas da cultura informando o operador para a realização de medidas corretivas somente onde necessárias.

SARAIVA *et al.* (1998) aponta quatro etapas básicas num sistema de AP:

1. Coleta de dados  $\Rightarrow$  onde se identifica a variabilidade existente na produção e nos diversos fatores de produção (tipo de solo, presença de pragas, ervas daninhas, etc.). Nesta fase há uma extensa coleta de dados da produção (colheita) e dos fatores de produção. Os equipamentos utilizados nesta fase são: coletores de dados e amostradores, imagens de satélites, fotos aéreas.
2. Gerenciamento da produção  $\Rightarrow$  a) processar dados para quantificar a variabilidade existente medida e avaliar sua relevância; b) relacionar a variabilidade da produção com os fatores de produção buscando relações de causa-efeito para propor estratégias de gerenciamento. Esta fase baseia-se em programas específicos (sistemas especialistas, GIS, etc). Tem-se como resultado final desta fase, mapas que quantificam as ações a serem tomadas em campo, ponto a ponto, para as diversas operações do processo produtivo, em particular àquelas relacionadas à aplicação de insumos, levando em conta o potencial de

produção de cada parte do talhão. Estes mapas serão transferidos para máquinas que irão realizar a aplicação localizada dos insumos.

3. Aplicação localizada de insumos  $\Rightarrow$  dispor de máquinas com capacidade de realizar a aplicação de insumos em taxa variável ao longo do talhão, de forma automática, e levando em conta sua posição no talhão. A aplicação é feita com base nos mapas da etapa anterior, que contém a recomendação da aplicação detalhada para cada ponto do terreno. O processo não acaba, mas permanece em constante realimentação, uma vez que a cada nova safra novos dados estão disponíveis, novos cenários se apresentam. Esta realimentação permite que se avalie a adequação da estratégia utilizada e refine cada vez mais todo o processo.
4. Avaliação dos resultados  $\Rightarrow$  está distribuída ao longo de todo ciclo.

O autor cita ainda os equipamentos utilizados nas atividades associadas à AP tais como monitores de colheita; coletores de dados; aplicadores de Taxa Variável; equipamentos de arquitetura aberta e programas para AP, enfocando a diversidade e a falta de padrões. As dificuldades encontradas foram quanto ao entendimento da variabilidade espacial e temporal e sua adequada manipulação, que passam por uma abordagem sistêmica do processo produtivo, já que as visões parciais não têm surtido efeito, além da falta de compatibilidade entre equipamentos por falta de padronização que gera problemas para os usuários que ficam presos a um único fornecedor com todas as implicações negativas envolvidas.

Sobre a geração de mapas de rendimento, MARTÍNEZ DE GUERENU *et al.* (1996) afirmam que esta será a ferramenta mais utilizada para monitoramento do desenvolvimento e produção de uma cultura. Dentro deste enfoque, THYLÉN (1996) estudou a elaboração de mapas de rendimento e aplicação de fertilizantes, encontrando respostas significativas no rendimento das áreas mapeadas.

Segundo SANAEI & YULE (1996) o primeiro estágio para a agricultura de precisão é a coleta precisa de dados a respeito da cultura para a geração dos chamados mapas de rendimento. Para os autores, a maior dificuldade está na construção de dispositivos de baixo custo e com boa precisão.

### **3.4 - Sistemas de monitoramento de rendimento**

Segundo JOHNSON (1996) para montar um sistema de monitoramento do rendimento, deve-se conhecer os princípios de operação da colheita mecanizada da cultura. Além disso, os sensores utilizados devem apresentar boa precisão e serem de fácil calibração. Em seu trabalho, o autor destaca várias empresas de porte mundial trabalhando com estes sistemas, como CASE, AGCO, JOHN DEERE, entre outras. Dentre as inúmeras técnicas para determinação do rendimento de uma cultura, as que se destacam são: sensores de impacto para medida de fluxo mássico, sensores baseados no peso do produto, sensores ópticos e sensores nucleares.

#### *3.4.1 - Monitor de fluxo mássico por impacto*

JOHNSON (1996) explica que esta técnica vem sendo utilizada pela empresa de máquinas agrícolas JOHN DEERE. A massa de grãos que está sendo colhida é determinada indiretamente por meio da medição da força de impacto exercida pelo grão, com velocidade conhecida, ao atingir uma placa ligada a um potenciômetro instalada na parte superior do elevador de canecas. Com este mesmo princípio de funcionamento, o potenciômetro pode ser substituído por uma célula de carga resistiva acoplada a uma placa/membrana, que ao ser carregada, apresenta uma variação de sua resistência. O rendimento é correlacionado com esta variação na resistência da célula de carga. Existem ainda, dispositivos mecânicos como hastes ou pás que ao serem atingidos pelos grãos em queda livre apresentam uma deflexão correlacionada com a quantidade de grãos que passa pela máquina.

O autor cita, ainda, que o bom funcionamento destes sensores dependem de diversos fatores como, por exemplo, a velocidade do elevador que deve ser mantida constante ou apresentar um monitoramento para posterior correção dos dados. Outro fator importante é a umidade do grão que deve ser determinada, pois influencia diretamente sobre o volume e peso do material colhido. Outro parâmetro de importância é relacionado com o tipo de grão, que irá influenciar sobre o fluxo do produto, forma e tamanho, densidade, temperatura e ângulo de descarga. Deve-se atentar também para grandes variações de temperatura ambiente sobre o funcionamento dos sensores. Uma forma de amenizar estes fatores é uma perfeita calibração do equipamento para as condições de campo encontradas.

COX *et al.* (1996) apresentaram um trabalho de desenvolvimento de um sensor de fluxo mássico para a cultura de cana-de-açúcar, baseado na determinação de pressões hidráulicas, fluxo de óleo e velocidade de deslocamento da máquina. Com os sinais obtidos com estes sensores determinaram a demanda de potência tanto do elevador quanto do picador do produto, relacionando esta quantidade com o fluxo de cana. O erro obtido no rendimento foi de aproximadamente 2%, e apresentou uma relação linear com o rendimento determinado com o uso de caminhões pesados na usina. COX *et al.* (1997) verificaram a utilização deste dispositivo no campo para obtenção de mapas de rendimento para a cultura de cana-de-açúcar. Este sistema de elaboração de mapas de rendimento apresentou erros na ordem de 10%.

#### *3.4.2 - Monitores de peso*

Segundo JOHNSON (1996) este tipo de equipamento apresenta certa vantagem em relação ao anterior devido ao fato de determinarem o peso do produto diretamente. Tal vantagem esbarra no fator custo, pois estes equipamentos mostram-se mais caros que os anteriores.

O princípio de funcionamento baseia-se em uma célula de carga ligada à um braço metálico, que suporta o seu peso próprio mais o peso dos grãos passando entre o braço e um rotor. O rotor repousa sobre uma placa que, por sua vez, repousa sobre o braço de medição. Este braço é pivotado, possuindo em sua extremidade uma célula de carga capaz de medir a força exercida sobre o braço, e com isso, a quantidade de grãos.

#### *3.4.3 - Monitores ópticos*

JOHNSON (1996) explica que a utilização deste tipo de sensor ainda não se encontra muito divulgada. Seu funcionamento consiste de uma fonte de luz e de um fotosensor para detectar a inclinação das canecas do elevador quando carregado. Este fotosensor é usado para detectar a luminosidade e energia radiante é convertida em sinal elétrico. Quando o fluxo de grão é baixo ou inexistente, as canecas bloqueiam o feixe de luz, assim, as medidas de períodos de luminosidade são usadas para estimar o volume de grãos.

#### *3.4.4 - Monitores radioativos*

JOHNSON (1996) explica que este tipo de monitoramento é muito preciso. Usa uma fonte radioativa que transmite um feixe de partículas através do elevador de grãos avaliando a quantidade de partículas que atinge o outro lado do elevador. Quanto maior a quantidade de grãos transportada, menor o número de partículas que passa através do elevador. Uma das vantagens destes sensores é que não necessitam de compensação de umidade pois o sinal obtido já leva em consideração este parâmetro. Uma desvantagem é o perigo oferecido pela radioatividade, dificultando sua aprovação para o uso em vários países.

#### *3.4.5 - Sensores de velocidade e largura de corte*

Para o cálculo do rendimento da cultura, no caso de cereais e outras culturas onde se colhe mais de uma linha, há a necessidade de conhecer a velocidade de deslocamento do equipamento e a largura de corte. A largura geralmente é fornecida ao sistema pelo usuário, sendo desta forma uma provável fonte de erro do sistema. A determinação da velocidade é necessária para a determinação da área colhida pela máquina. O sinal da velocidade pode ser fornecido por um radar ou detector do tipo ultra-som ou, com menor precisão, por um sensor de rotação fixado na roda da máquina. A velocidade pode ainda ser obtida com o uso do GPS, (JOHNSON, 1996).

#### *3.4.6 - Sensores de umidade*

A umidade da amostra de grãos tem influência sobre o peso e o volume do material. Por este motivo, deve ser determinada para posterior correções na indicação do rendimento. Os dispositivos mais comuns para obtenção deste valor são os sensores capacitivos, (JOHNSON 1996).

#### *3.4.7 - Precisão dos monitores de rendimento*

Os dispositivos comercialmente avaliados para a medição de rendimento em grãos fornecem uma precisão de 2 a 3%. Este valor pode ser comprometido pelo mau uso do sistema, como calibração incorreta e efeitos de temperatura não corrigidos, (JOHNSON, 1996).

Segundo BLACKMORE & MARSHALL (1996) seis erros têm sido identificados em mapas de rendimento. São eles: não conhecer largura de corte durante a colheita, tempo de residência dos grãos dentro da colhedora, erros inerentes do GPS, o fato da massa de grãos caminhar como uma onda dentro do sistema de transporte da colhedora, perda de grãos pela colhedora e acurácia do sensor e calibração.

#### *3.4.8 - Operadores de interface*

Ainda, segundo JOHNSON (1996), o sistema de monitoramento de rendimento é também composto por outros dispositivos além dos sensores. O sistema tem uma interface com o usuário e algum tipo de computador de bordo. A interface com o usuário é geralmente uma caixa montada na cabina, onde pode ser observado o andamento do trabalho. Esta caixa recebe os sinais vindos dos sensores de rendimento, calcula a taxa de rendimento atual e apresenta este valor em um visor. Um computador portátil é responsável por outras ações, como, por exemplo, armazenar os dados da interface em relação aos dados de posicionamento do equipamento, obtidos pelo GPS.

### **3.5 - Sistemas de medição da produtividade**

Segundo EARL *et al.* (1996) a MASSEY FERGUSON, em conjunto com o Silsoe College, Inglaterra desenvolveram uma carreta com um sistema de pesagem para trabalhar na colheita de beterraba como mostra a Figura 5. A carreta instrumentada se move junto com a colhedora, portanto não houve necessidade de alterar os equipamentos de colheita já utilizados. A desvantagem deste método é que na maioria dos casos são necessárias no mínimo três carretas para maximizar a operação. O uso de uma só carreta significa que ou a taxa de trabalho foi reduzida, ou nem todo campo foi monitorado e então se faz necessário o uso de softwares para interpolação dos dados que foram registrados. A carreta instrumentada primeiramente foi desenvolvida como ferramenta de pesquisa, e também para desenvolver suficientemente a tecnologia para posteriormente ser adaptada às máquinas colhedoras, como no caso da beterraba e da batata. A instrumentação e o processamento dos dados usam um filtro de sinal e um algoritmo que permite o monitoramento de um carregamento na taxa de  $\pm 0,2$  kg/s. Este sistema foi suficientemente acurado para fornecer os dados para a produção dos mapas de rendimento.



**Figura 5** – Carreta instrumentada, em colheita de beterraba (Fonte: EARL, 1996).

Um trabalho similar a este foi realizado por PIEROSSI & HASSUANI (1997) na tentativa de produzir mapas de rendimento da cultura de cana-de-açúcar. Os autores montaram sobre quatro células de carga de compressão, uma caçamba de báscula superior, permitindo, desta forma, a leitura da carga total da caçamba independente da distribuição desta em seu interior. A capacidade volumétrica da caçamba é de  $12 \text{ m}^3$ , ou seja, aproximadamente quatro toneladas de cana picada. Tal projeto foi desenvolvido na tentativa de solucionar o primeiro passo do ciclo da agricultura de precisão que refere-se a obtenção de dados de produtividade da cultura de cana-de-açúcar.

ELIAS (1998) relatou o desenvolvimento, construção e uso no campo, de um sistema de instrumentação e aquisição de dados para o mapeamento da produtividade da cultura de milho. Um sistema automático de medição do peso dos grãos colhidos foi desenvolvido utilizando um sub-tanque graneleiro apoiado sobre quatro células de carga dentro do tanque da colhedora, sem nenhuma modificação estrutural da mesma, obtendo um erro máximo de 3,99 N para uma capacidade do sub-tanque de 4.905 N. Um sistema de GPS móvel foi utilizado como base para correção diferencial utilizando pós-processamento dos dados de posição. Os sistemas de medição automático de peso e de posicionamento, permitiram a obtenção do mapa de produtividade para a cultura do milho em uma área de aproximadamente 7 ha, onde o autor verificou que 75% das células de 10,8 m de comprimento e 3,6 m de largura, possuíam uma produtividade na faixa de 3,23 a 5,93  $\text{t ha}^{-1}$ , para uma produtividade média da cultura de 3,73  $\text{t ha}^{-1}$ . A principal vantagem do sistema de pesagem automático está no fato do mesmo permitir a obtenção direta do peso dos grãos colhidos, sem a necessidade de sensores para a medição do fluxo de grãos e calibragem para cada cultura. O mesmo princípio poderá ser

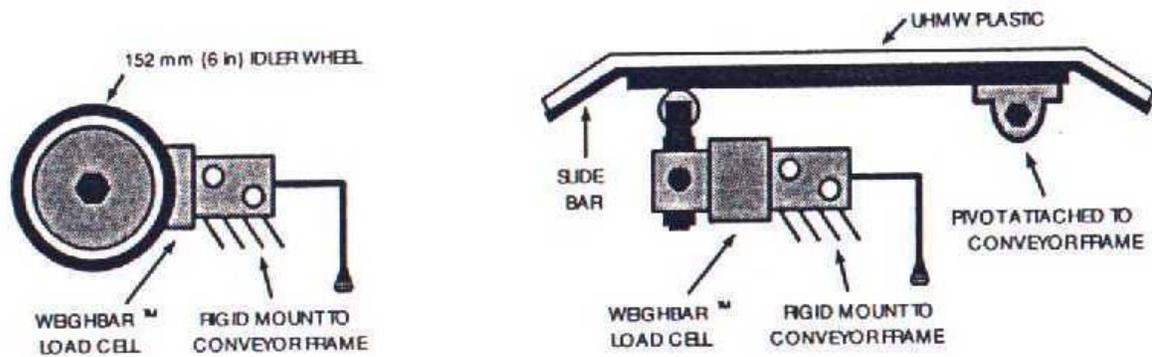
---

adaptado para o mapeamento da produtividade de culturas, onde o sistema de medição de fluxo de massa não possa ser utilizado.

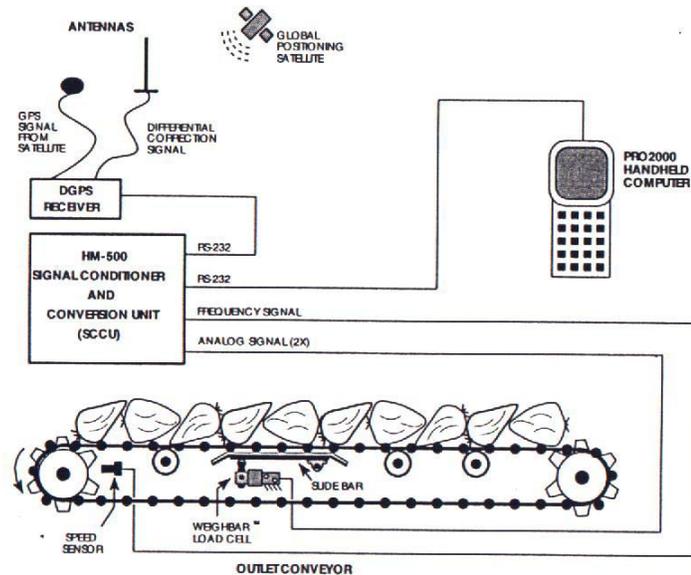
SCHNEIDER *et al.* (1996) desenvolveram um sistema de monitoramento da produção de batata composto por um condicionador de sinais e uma unidade de controle, sensor para medir a velocidade da correia transportadora e células de carga, DGPS, computador “on-board” e um modem com frequência de rádio (RF). A unidade de controle foi especificamente projetada para medir o fluxo do material colhido no campo, usando sistema de esteiras. Com um condicionador de sinais e unidade de controle, este sistema faz aquisição de dados múltiplos, tanto dos sensores, como do receptor DGPS, e transfere toda informação através de um canal em série RS-232 para o computador. O sensor de massa (célula de carga) é montado em uma barra engastada com fundo de escala de 2250 N. A resolução é compensada pela alta sensibilidade do sistema. O sensor de velocidade da correia transportadora é fixado ao lado do eixo no qual um magneto foi montado. O computador recebe informação da velocidade da correia e o peso que foi colhido por comprimento da correia com uma taxa de 100 Hz. O computador faz os cálculos da produção por área sendo os resultados então armazenados em um cartão PCMCIA e transmitidos via frequência de rádio (RF) para um escritório local para monitoramento da produtividade. O tempo e a posição foram registrados separadamente utilizando um receptor (PRO/XL) com acuracidade menor que 1 m, registrando os dados a cada 2 s sem correção do tempo. Várias etapas de pós-processamento são necessárias, para gerar mapas de rendimento da cultura de batata a partir de arquivos de dados de produção de campo e arquivos de posição GPS. Registros indesejáveis, como valores negativos de peso, foram removidos dos arquivos. Os tempos registrados no arquivo foram então ajustados para corrigir a diferença de tempo entre o momento da colheita e o momento da pesagem, conhecido como “*lag time*”. Os tempos originais registrados no arquivo referem-se ao momento de pesagem. O tempo de atraso, ou *lag time*, depende da distância total percorrida pela massa de batata no interior da colhedora e sua velocidade para percorrê-la. A distância total percorrida pela massa de batata era aproximadamente constante e a velocidade de deslocamento era a mesma da velocidade da esteira. Então, o tempo de atraso poderia ser calculado a partir da velocidade da esteira. Este algoritmo foi mais preciso que a aplicação de um tempo de atraso fixo que não leva em conta o início ou o fim das operações da máquina. O tempo no qual a batata foi colhida pôde então ser calculado usando o tempo no momento da

pesagem e o tempo de atraso. O arquivo de produção ajustado e o arquivo do GPS foram unidos de acordo com seu índice comum, o tempo do satélite. O intervalo de registros nos dois arquivos foram diferentes, então uma interpolação linear das posições foi usada quando os tempos registrados não coincidiam. Ocasionalmente, o GPS pode perder sinais ou posições erradas podem ser registradas, estas posições são avaliadas e removidas quando necessário. Cada registro no arquivo final representa uma medida de peso instantânea. O erro aleatório, provocado pela falta de estabilidade dos dados, como é o caso de muitos monitores de grãos, pode ser anulado pela média de várias medidas instantâneas. Um algoritmo foi usado para determinar a média das medidas de peso dentro de uma distância fixa de 15 m. Este método é preferível por usar um número fixo de pontos, considerando a possibilidade de início ou fim das operações da máquina.

Usando um princípio muito parecido com o anterior, WALTER *et al.* (1996) descrevem o sistema de monitoramento da produção de beterraba. Os autores testaram duas configurações diferentes de sensores de peso, mostradas na Figura 6. As duas configurações usaram células de carga abaixo da correia transportadora para converter informações de peso em sinais elétricos para posterior processamento. A primeira configuração consistia em colocar em cada lado da correia, uma roda de 152 mm presa a uma célula de carga, tomando como hipótese que cada roda recebe considerável impacto de cada talisca. A segunda configuração consistia de uma placa com 50,8 mm de largura por 609,6 mm de comprimento coberta por um plástico *ultra high molecular weight* (UHMW) com 9,53 mm de espessura. Uma das extremidades da placa era fixada em uma barra pivotante presa à correia, enquanto que a outra era engastada verticalmente em uma célula de carga. Este dispositivo substituiu duas rodas em cada lado da correia. Foram realizados testes laboratoriais para calibração do sistema em ambas as configurações, mantendo a velocidade da correia constante em 0,613 m/s, simulando a velocidade típica da colheita de beterraba, sem peso, podendo desta forma zerar a indicação de carregamento e depois colocando pesos conhecidos. Os testes de campo apenas utilizaram a configuração da placa de pesagem que foi instalada na parte externa da correia da colhedora, durante a safra de 1995 (Figura 7). Os dados de produção georreferenciados foram armazenados em diversos arquivos e os mapas de rendimento foram então desenvolvidos. Os autores concluíram que a configuração da roda de pesagem produzia um erro de 3,5% do peso real enquanto que a placa apresentava erro de 2,3%.



**Figura 6** – Dispositivos a serem adaptados à esteira de uma colhedora de beterraba (Fonte: WALTER *et al.*, 1996)



**Figura 7** – Configuração do equipamento de monitoramento de produtividade de beterraba e diagrama de conexão (Fonte: WALTER *et al.*, 1996)

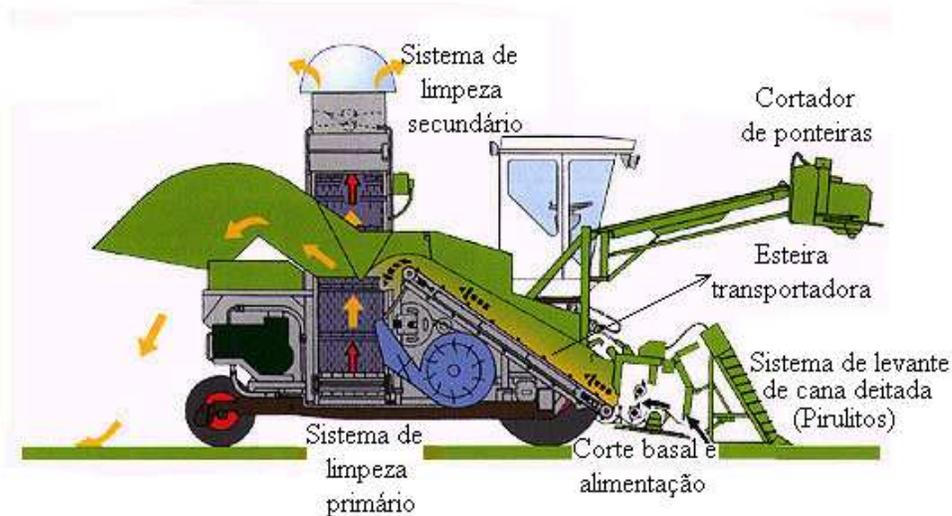
### 3.6 - Máquinas para colheita de cana-de-açúcar

Segundo MAGALHÃES & BRAUNBECK (1998) existem dois tipos básicos de colhedoras para colheita de cana-de-açúcar, inteira e picada, ambas utilizadas em canaviais queimados, podendo, alguns modelos, serem utilizados em cana crua. O Brasil importou a tecnologia de colheita de cana-de-açúcar de países como Austrália e Cuba, onde a colheita

mecanizada é predominantemente picada, e são estes tipos de colhedoras que estão sendo empregadas, embora alguns autores discutam a viabilidade e eficiência deste sistema.

Estas colhedoras possuem as seguintes características e componentes básicos, Figura 8:

a) são autopropelidas; b) mecanismos para levantamento de cana deitada; c) mecanismo de corte basal e alimentação; d) picadores de colmo; e) sistema de limpeza; f) esteira transportadora (lateral); g) cortador de ponteiros.



**Figura 8** – Corte esquemático de uma colhedora de cana-de-açúcar (Fonte: Claas CC-3000)

No Brasil, além do sistema australiano, existem as colhedoras “SANTAL ROTOR” e “AMAZON”, que substituíram as esteiras transportadoras por rotores lançadores inerciais de toletes.

Dentre os modelos estrangeiros, os mais comuns nas usinas brasileiras, são a CLAAS CC-3000 e VENTOR, da Alemanha, e a AUSTOFT 8000, da Austrália.

Para a cana-de-açúcar inteira existiram alguns modelos no Brasil, como a MOTOCANA CM-500i, a ENGEAGRO E7000 e a E14000, que possuem em sua configuração um sistema de alimentação, corte de base e remoção de ponteiros. Um depósito na parte posterior permite o acúmulo de material para posterior descarte ao solo, estas colhedoras em sua grande maioria já foram desativadas. Um protótipo com base nos modelos norte-americanos da Louisiana foi desenvolvido na COPERSUCAR (DUNCAN-2), mas não obteve êxito e atualmente seu projeto foi desativado.

### **3.7 – Vantagens e desvantagens do uso de agricultura de precisão na cultura de cana-de-açúcar.**

BALASTREIRE (1998) apresenta um importante trabalho sobre o potencial de utilização dos conceitos de AP na cultura de cana-de-açúcar. Em seu artigo o autor ressalta entre os principais benefícios que a aplicação deste conceito pode trazer, como: a) possibilidade de redução da poluição ambiental, tema extremamente importante nos dias de hoje, onde cada vez mais se busca uma agricultura sustentável; b) benefícios econômicos, onde a redução do custo final do produto pode ser obtido retirando-se os insumos de pontos de baixo potencial de produção e redirecionando para pontos de maior potencial; c) ganho de produtividade, com aumento da produtividade e/ou aumento da quantidade de açúcar disponível na cana. Ainda, segundo BALASTREIRE (1998), o potencial de se aplicar os conceitos de AP na cultura de cana-de-açúcar se divide em 4 frentes:

1. Mapeamentos de solo – este irá mostrar o potencial de fertilidade de solo, o que permitirá o estabelecimento de estratégias de aplicação de fertilizantes.
2. Mapeamento da cultura – que irá permitir a obtenção de mapas georreferenciados dos talhões e da cultura em seus diversos estágios.
3. Mapeamento da colheita – utilizando-se um sensor de fluxo de massa pode-se obter um mapa de produtividade de cada célula dentro do talhão. Com o geo-referenciamento tem-se a exata localização de cada célula, então, pode-se verificar em loco qual foi o motivo da baixa produtividade.
4. Aplicação localizada de insumos – A decisão sobre o melhor método de gerenciamento da área pode ser feito por meio de programas computacionais específicos, desenvolvidos para a agricultura, que fornecem mapas de aplicação localizada de insumos. Com o auxílio de equipamentos especialmente instrumentados para o controle da aplicação pode-se aplicar a quantidade requerida em cada célula para se utilizar o seu máximo potencial de produtividade.

O autor conclui seu artigo afirmando que para se utilizar esta tecnologia no Brasil, “há que se envidar esforços, para o desenvolvimento destes equipamentos adaptados às condições do país, quando então se poderá atingir todo o potencial deslumbrado para a AP na cultura da cana-de-açúcar”.

BRAMLEY *et al.* (1997) observam que o componente crítico para o sistema de produtividade de cana-de-açúcar, é o sensor para medir o fluxo de massa através da colhedora e também a produtividade por metro linear. Na cultura de cana-de-açúcar, onde as perdas estão, talvez, entre 10 % ou 15 %, a medição da produtividade no elevador ao invés de ser no cortador, subestima o valor real de produção. As perdas dependem tanto do ajuste da colhedora, como das condições do talhão. A operação do elevador pode fornecer um sinal aceitável, mas não preciso, pois a cana-de-açúcar é cortada e armazenada em um bojo em vários pontos do ciclo, portanto as leituras do sensor não registram o final das linhas. Em colhedoras de grãos, o registro dos dados é interrompido quando a frente é levantada, e isso ocorre ao final da linha.

### 3.8 – Métodos usados para analisar dados de Agricultura de Precisão

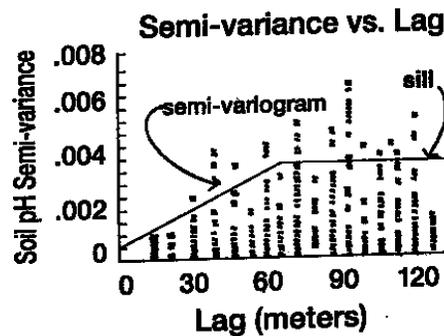
Segundo MORGAN & ESS (1997) quando se faz a aquisição de dados segundo a segundo, com um monitor de produtividade, algumas técnicas simples são usadas para visualizar a tendência destes dados. No entanto, quando cria-se mapas com dados esparsos de atributos de solo, deve-se usar outros métodos para preencher as lacunas entre os pontos medidos. Os dados devem ser utilizados para estimar os valores de propriedade do solo entre os pontos amostrados do campo. Este procedimento é chamado de interpolação. Interpolação é o procedimento para prever valores desconhecidos usando valores conhecidos em localizações vizinhas. Quando usada para mapas de propriedade do solo, baseia-se na premissa que aquela propriedade do solo em um local não amostrado pode ser estimado pela combinação de valores de amostras de solo adjacentes. Os métodos de interpolação mais conhecidos são:

- a) *Vizinho Próximo (Nearest neighbor)* – é o mais simples dos métodos de interpolação. Somente as amostras mais próximas são usadas para fazer a estimativa. Neste caso, os valores desconhecidos são ajustados para serem iguais ao seu vizinho próximo.
- b) *Média Local (Local Average)* – estima os valores desconhecidos pela simples média de um número selecionado de pontos ao redor da localização desejada.
- c) *Inverso do Quadrado da Distância (Inverse Distance Weighting)* – similar à Média Local, exceto que as amostras mais próximas às localizações não amostradas têm mais influência na estimativa que as amostras mais distantes. Este método assume que o valor do ponto desconhecido é mais similar ao ponto mais próximo que ao mais

distante. Então, pontos perto ao ponto desconhecido na média, têm mais peso. Quando se usa o Inverso do Quadrado da Distância, geralmente deve-se especificar a distância, onde o fator multiplicativo se torna zero. Isto significa, que somente os pontos mais próximos que esta distância, são usados para calcular o valor no ponto de interpolação.

- d) *Krigagem (Kriging)* – é o método mais complexo usado na agricultura de precisão. A Krigagem tem se destacado por criar interpolações muito boas em mapas como o de propriedades do solo, desde que sejam coletados dados suficientes para usá-la apropriadamente. Segue-se dois passos básicos: primeiro é feita uma estimativa da variabilidade que existe em cada linha de dados, então, é feita a interpolação usando os mesmos princípios básicos que os métodos mais simples. Esta análise de pré-interpolação, basicamente determina quão rápido os valores mudam, conforme se move através do campo. Esta medida de variabilidade é então usada para adequar o método para o melhor ajuste dos dados. Assim, para determinar uma medida de variabilidade dentro do campo, são calculadas semivariâncias para cada combinação de pontos. Para calculá-la, toma-se dois valores de dados, subtrai-se um do outro, eleva-se o resultado ao quadrado e o divide por dois. Por exemplo, ao medir o pH do solo no ponto A e no ponto B a semivariância para o par A e B, poderia ser  $\frac{1}{2} (\text{pH}_A - \text{pH}_B)^2$ . Esta semi-variância é calculada para todos os possíveis pares de pontos a uma distância  $h$ , e dá uma medida de quanto os pontos vizinhos diferem em valor. Também diz, quanto qualquer ponto difere do valor de dois, três ou mais pares afastados. Então, todas as semivariâncias são inseridas no gráfico contra a distância entre dois pontos usados em cada cálculo. Esta distância é chamada de *lag*. Inserindo todas as semivariâncias versus seus lags tem-se um gráfico similar à Figura 9. A linha desenhada nesta figura, para ajustar os dados, é chamada de semivariograma. A parte inclinada do gráfico é uma medida da taxa com a qual os valores mudam quando move-se de um ponto para o outro no campo. Então, uma reta relativamente plana indica que os valores mudam muito lentamente conforme move-se de um ponto para outro. Em contraste, uma reta muito inclinada indica que os dados mudam muito rapidamente. O máximo valor do semivariograma indica a quantidade de variabilidade que existe. Este máximo valor é chamado de patamar (*sill*). Um valor de patamar baixo significa que os dados não variam muito de ponto para ponto, e vice-versa. Com estas

duas medidas de quanto e como os dados mudam através do campo, o método de Krigagem pode ser usado mais acuradamente. Para predizer valores de pontos desconhecidos, valores de dados que estão a uma distância menor têm, basicamente, peso relativo ao inverso da distância, assim como aqueles cujas distâncias são maiores. A distância na qual esta mudança de peso ocorre é determinada pelo semivariograma. Esta é a distância na qual, no gráfico, as porções plana e inclinada se interceptam. A rotina de Krigagem faz a maioria destes procedimentos automaticamente.



**Figura 9** – Gráfico de semivariâncias versus a distância (lags) entre os pontos usados para os valores calculados. (Fonte: MORGAN & ESS, 1997)

## IV – MATERIAL E MÉTODOS

### 4.1 – Material

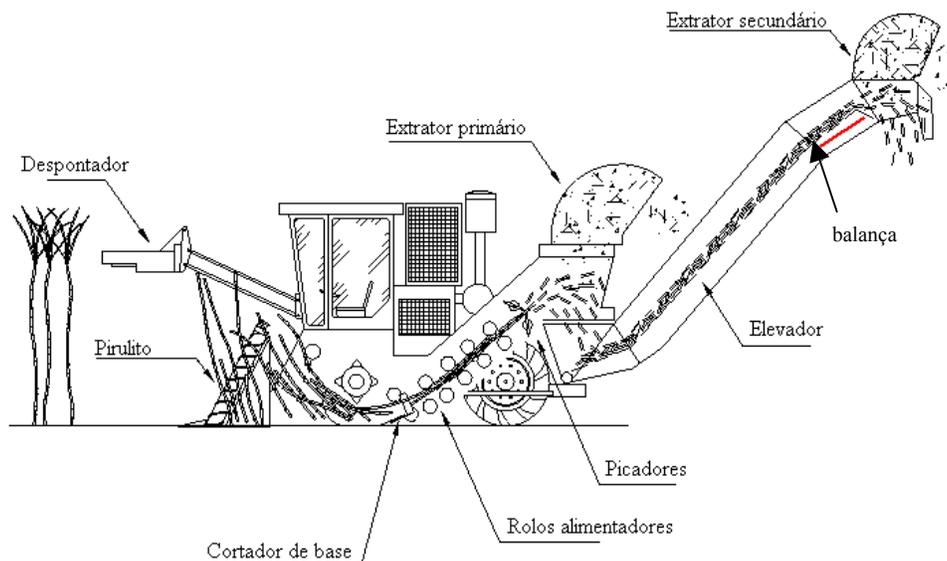
O material utilizado para o desenvolvimento do trabalho nos ensaios de laboratório e nos ensaios de campo foram:

- Micro computador portátil COMPAQ Presario 1900;
- Acelerômetro tipo Piezoelétrico, marca Kistler, modelo 8634B5, Sensibilidade nominal: 985mV/g, aceleração máxima: + - 5g, frequência de ressonância: 9kHz;
- Condicionador de sinais para acelerômetro, marca Klistler, modelo 5134, 4 canais, filtros incorporados, ganhos ajustáveis;
- Células de carga ALFA INSTRUMENTS (GL-10 e GL-20), com fundo de escala de 100 e 200 N;
- Placa de aquisição de dados SC-2043-SG da *National Instruments*;
- Cartão PCMCIA DAQCard 1200 da *National Instruments*;
- Sensor de proximidade, tipo Indutivo, marca Omrom, modelo TL-X5MB1 – GE, chaveamento: PNP, alimentação: 12 Vc;
- Elevador da colhedora de cana-de-açúcar BRASTOFT A-7700 para ensaios laboratoriais;
- Colhedora CAMECO CHT2500B para ensaios de vibração e ensaios na Usina Cresciumal;
- Colhedora BRASTOFT A-7700 para ensaios preliminares na Usina Santa Adélia;
- Receptor GPS AgGPS 132/Beacon/Banda L integrados, 12 canais paralelos, opção “Fast Rate” 10Hz, receptor beacon com 2 canais digitais, capaz de receber correções diferenciais via satélite Banda L, RTCM-SC 104 input, precisão submétrica, processamento de informações em tempo real, duas portas padrão RS 232;
- Receptor Base AgGPS 122/Beacon integrados, transmite correções diferenciais tipo RTCM-SC 104, 12 canais paralelos, opção “Fast Rate” 10Hz, receptor beacon com 2 canais digitais, RTCM-SC 104 input e output, antena GPS/Beacon integrada, precisão submétrica, processamento de informações em tempo real, duas portas padrão RS 232;

- *Software AutoCAD 2000 da Autodesk;*
- *Software LabVIEW 5.1 da National Instruments;*
- *Software IDRISI32 da Clark Labs;*
- *Software MATLAB 5.0 da The MathWorks, Inc.*

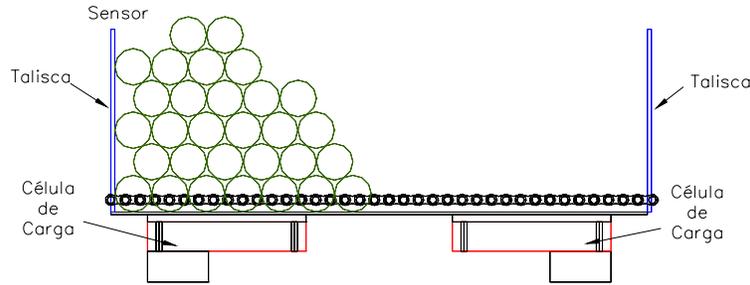
#### 4.2 – Métodos

O sistema proposto consistiu em instalar em uma colhedora de cana-de-açúcar um sistema de medição capaz de mensurar o fluxo de rebolos que passa pela esteira antes de serem lançados ao veículo de transbordo que a acompanha, utilizando células de carga como instrumento de determinação do peso da matéria-prima colhida, e um software para que, com base na velocidade de deslocamento da massa de rebolos sobre a esteira e informações sobre a localização geo-referenciada da colhedora, possa calcular a produtividade da área. Este sistema de pesagem foi construído para ser instalado no elevador da colhedora como mostra a Figura 10.



**Figura 10** – Esquema de colhedora com a localização do sistema para pesagem dos rebolos

O transdutor para pesagem dos rebolos consiste de uma placa de metal isolada mecanicamente da estrutura da esteira apoiada sobre as células de carga, que permite a medição da massa de rebolos independente do posicionamento da massa sobre a chapa de metal, conforme pode ser observado no esquema mostrado pela Figura 11.



**Figura 11** – Esquema de montagem das células de carga (vista lateral)

Para transportar os rebolos que saem do picador da colhedora para o veículo de transbordo, a esteira elevadora, como é designada pelos fabricantes, é composta por um conjunto de taliscas presas por correntes que conduzem os rebolos de cana-de-açúcar sobre uma chapa de metal fixa. Esta esteira é acionada por um motor hidráulico com deslocamento constante.

Para a instalação do dispositivo proposto, retirou-se uma parte desta chapa fixa e adaptou-se o transdutor construído, conforme pode ser observado na Figura 12.



**Figura 12** – Acoplamento do transdutor na esteira de uma colhedora BRASTOFT A-7700

Preliminarmente foi realizado um estudo da frequência de vibração da esteira de uma colhedora trabalhando no campo, para que se pudesse determinar qual seria a melhor instrumentação bem como a melhor frequência de amostragem a ser utilizada. Para isso, foram utilizados acelerômetros acoplados em vários pontos da esteira, onde os dados analógicos foram convertidos em digitais por meio de um conversor A/D e, então armazenados em um microcomputador. A partir destes dados, utilizando um algoritmo Transformada Rápida de

---

Fourier (*Fast Fourier Transform* – FFT), determinou-se o espectro de frequência da vibração, utilizando-se o *software* Matlab 5.0.

A instalação da balança foi feita na parte superior do elevador, onde a inclinação é menor, como pode-se observar pela Figura 10 e onde, a maior parte das impurezas, inclusive as palhas, já foram eliminadas pelos rolos de corte e alimentação ou pelo extrator primário.

As inclinações do terreno implicam em mudança de inclinação do elevador, mas devido às dificuldades encontradas para monitorar estas diferenças de inclinação, optou-se por realizar os ensaios em terreno plano, pois não foi encontrado, no mercado, um nível eletrônico com tempo de resposta suficientemente rápido.

O dimensionamento do transdutor foi feito com base na produtividade máxima esperada de um canavial, na velocidade de deslocamento da esteira e da colhedora. Obtendo-se assim uma estimativa da quantidade máxima e mínima de cana que estará sendo pesada em um determinado período. Desta forma, adotando-se a velocidade da colhedora como sendo de 4 km/h e que a produtividade de um canavial pode variar de 70 a 120 Mg ha<sup>-1</sup>, sabe-se que a quantidade colhida poderá variar de 8,5 a 14,5 kg s<sup>-1</sup> que corresponde a uma variação de 7,7 a 13,2 kg m<sup>-1</sup>. Projetando-se um balança de comprimento de 0,5 m, e sabendo-se que a velocidade das taliscas é de aproximadamente 2,3 m s<sup>-1</sup>, obtém-se que o peso médio medido pelo transdutor será de aproximadamente 19 a 32 N. As células deverão ainda suportar o peso da placa de pesagem e as sobrecargas que por ventura ocorrerem nos ensaios de campo. Portanto optou-se pelo uso de 4 células com fundo de escala superior a 100 N. Estas sobrecargas podem acontecer devido ao acúmulo de material colhido em manobras ao final das linhas do talhão, ao embuchamento ou devido às forças inerciais da massa de rebolos a ser pesada quando a colhedora está em movimento.

Para a aquisição de dados, tanto de laboratório como de campo, foi escrita uma rotina para ser utilizada com o *software* LabVIEW 5.1, em conjunto com o cartão de conversão de dados analógicos em digitais DAQCard 1200 e uma placa de aquisição SC-2043-SG, todos da *National Instruments*. O LabVIEW 5.1 é um ambiente de desenvolvimento de programas, mais moderno que a linguagem C ou BASIC. No entanto, é diferente destes sistemas de programação, pois não usa linguagem baseada em texto para criar linhas de código, mas sim uma linguagem gráfica, chamada linguagem G, para criar programas na forma de diagrama de bloco. Assim como o C ou o BASIC, é um sistema de programação com extensas bibliotecas

de funções para qualquer tarefa de programação, e ainda inclui bibliotecas para aquisição de dados, controle de instrumento serial e GPIB, análise, apresentação e armazenagem de dados.

O LabVIEW 5.1 também inclui bibliotecas de funções e ferramentas de desenvolvimento projetadas especificamente para aquisição de dados e controle de instrumentos. Os programas em LabVIEW 5.1, também são chamados de *virtual instruments* (VIs) porque sua aparência e operação pode imitar os instrumentos reais. No entanto, os VIs são similares às funções das linguagens de programação convencional. Um VI consiste de uma interface interativa com o usuário, um diagrama de fluxo dos dados que serve como a fonte de códigos, e conexões por ícones.

#### 4.2.1 – Calibração das células de carga

##### 4.2.1.1 - Estática

Para se determinar as características estáticas de cada célula de carga experimentalmente desenvolveu-se um VI no LabView (ANEXO 1). Um suporte para fixar cada célula de carga foi construído, e utilizando-se massas padrão fornecidas pelo INPM (Instituto Nacional de Pesos e Medidas), na faixa de X a Y kg, sobre a célula como “input” mediu-se o sinal gerado em mV/V, “output” da célula, baseando-se nas Normas da ABNT para calibração deste tipo de transdutor. Os testes foram conduzidos em ambiente controlado onde o VI, para cada ponto de calibração, coletava dados por 10 segundos a uma frequência de 100 Hz, e posteriormente calculava-se a média destes e armazenava-a. Este levantamento permitiu determinar a curva de calibração estática para cada célula, além de verificar sua acurácia, histerese, e repetibilidade.

##### 4.2.1.2 - Dinâmica

A fidelidade com que se pode medir o valor da carga sobre a balança depende principalmente do tempo de resposta de um transdutor de força quando submetido a cargas periódicas. Em sistemas mecânicos como o aqui proposto a aplicação de  $F(t)$  requer um tempo para ser registrada e a resposta dinâmica deste sistema de segunda ordem submetido a uma força periódica pode ser avaliada por meio de um ensaio dinâmico.

A equação (1) representa este sistema

$$\frac{\partial^2 \Delta x}{\partial t^2} + 2\xi\omega_n \frac{\partial \Delta x}{\partial t} + \omega_n^2 \Delta x = \frac{\Delta F}{m} \quad (1)$$

onde  $\omega_n$  é a frequência natural do sistema e é dada por  $\sqrt{\frac{k}{m}}$  e  $\xi$  representa a fração de amortecimento e é dado por  $\frac{\zeta}{2\sqrt{km}}$ , onde  $\zeta = \xi/\xi_{\text{crítico}}$ .

Como o grau de amortecimento deste tipo de célula de carga é muito baixo, somente as soluções para sistemas sub-amortecidos ( $\xi < 1$ ) precisam ser consideradas.

Desta forma a equação que descreve o comportamento da força ( $F(t)$ ) submetida a uma variação na forma de degrau da carga ( $\Delta F$ ) é dada por:

$$F(t) = \Delta F \left[ 1 - e^{-\xi \omega_n t} * \left( \cos \left( \omega_n * \sqrt{1 - \xi^2} * t \right) + \frac{\xi}{\sqrt{1 - \xi^2}} * \text{sen} \left( \omega_n * \sqrt{1 - \xi^2} * t \right) \right) \right] \quad (2)$$

Considerando que o sobre sinal máximo ( $f_0 - 1$ ) é dado por:

$$(f_0 - 1) = \exp \left[ \frac{-\pi * \xi}{\sqrt{1 - \xi^2}} \right] \quad (3)$$

e que o pico da primeira oscilação ocorre a um tempo ( $t_p$ ), um valor estimado de  $\xi$ , e  $\omega_n$  podem ser encontrado medido-se o valor e o tempo do sobre sinal máximo, sendo que  $\omega_n$  é dado por:

$$\omega_n = \frac{\pi}{t_p * \sqrt{1 - \xi^2}} \quad (4)$$

Quando submetido a uma força periódica na forma de  $F(t) = F_0 \text{ sen } \omega t$  a equação (1) fica na forma de:

$$\frac{\partial^2 \Delta x}{\partial t^2} + 2\xi \omega_n \frac{\partial \Delta x}{\partial t} + \omega_n^2 \Delta x = \frac{\Delta F}{m} * \text{sen } \omega t \quad (5)$$

onde  $\omega$  representa a frequência de excitação da força aplicada.

Como se trata de uma função periódica, o termo transiente da solução desta equação é de pouca valia, e deve-se esperar que ele decresça a zero e então medir o sinal senoidal.

A razão entre as amplitudes e a diferença de fase pode ser determinada por:

$$s/s_o = \frac{1}{\sqrt{\left[ \left(1 - \omega^2 / \omega_n^2\right)^2 + 4\xi^2 * \omega^2 / \omega_n^2 \right]}} \quad (6)$$

$$\phi = -\tan^{-1} \left[ \frac{2\xi\omega / \omega_n}{1 - \omega^2 / \omega_n^2} \right] \quad (7)$$

#### 4.2.1.3 - Calibração no Campo

Tanto nos ensaios de laboratório como nos ensaios de campo, com o elevador em posição de trabalho, e com o transdutor montado, calibrou-se a balança colocando-se massas padronizadas fornecidas pelo Instituto de Pesos e Medidas sobre esta para conferir a calibração e determinar possíveis fatores de correção, conforme ilustra a Figura 13. Nesta calibração utilizou-se o mesmo VI de aquisição dos dados para ensaios, e o resultado foi analisado a partir da soma das células. Desta forma todas as leituras de peso realizadas durante os ensaios foram convertidas em massa, permitindo que a apresentação e análise dos resultados fossem feitas em quilo ao invés de Newton.



**Figura 13** – Calibração da balança montada na colhedora



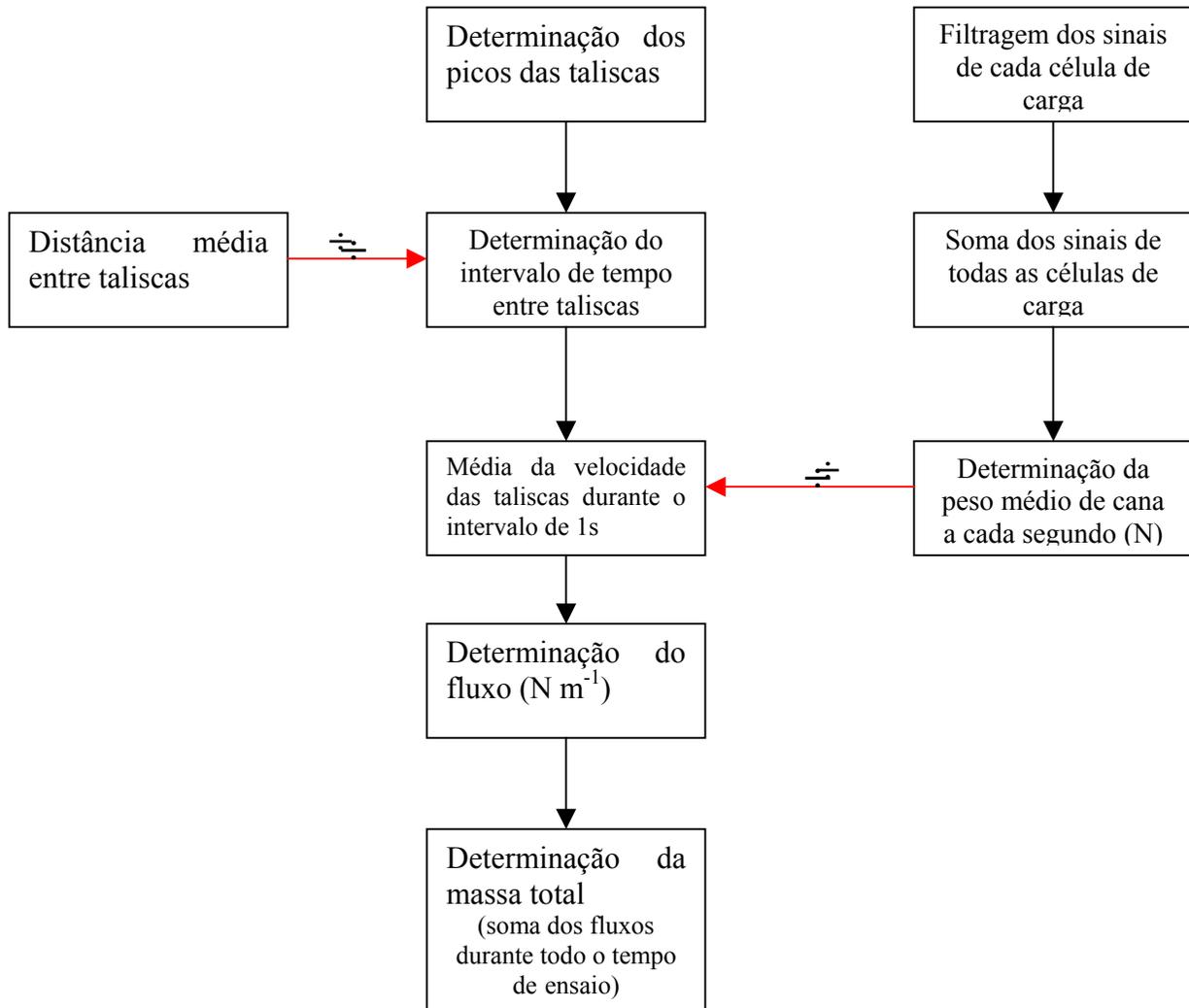
Os ensaios para determinação do espectro de frequência foram feitos em uma única célula, com taxa de amostragem de 1000 Hz em duas situações: somente com o motor da unidade hidrostática ligado e posteriormente com a esteira em movimento.

Para minimizar os ruídos advindos da eletricidade e da vibração mecânica, utilizou-se um filtro analógico Butterworth tipo passa-baixa de ordem 2, com frequência de corte ( $f_c$ ) de 7 Hz. Esta frequência é o dobro da frequência com que a massa de rebolos passa sobre o dispositivo de medição. Como a velocidade média das taliscas é de  $2,3 \text{ m s}^{-1}$  e a distância entre taliscas é de aproximadamente 0,6 m obtém-se que a frequência de passagem das taliscas, que seria a máxima frequência de passagem das massas a serem pesadas é igual a 3,78 Hz.

Foram conduzidos dois tipos de ensaios de laboratório. No primeiro, fixou-se na balança massas de 1 e 2 kg para a simulação de um fluxo contínuo e uniforme, e no segundo tipo de ensaio utilizou-se corpos cilíndricos de massa aproximada de 1,5 kg passando sobre a esteira, para simular a passagem das canas em condições de campo.

Os cálculos de produtividade em função dos fluxos foram feitos pelo VI desenvolvido no LabVIEW 5.1 que realiza a filtragem da soma dos sinais das quatro células; calcula a velocidade média da esteira e a massa média por segundo de ensaio; e o fluxo e a massa total que passou pela esteira, como apresentado no ANEXO 3.

A massa total de rebolos de cana-de-açúcar que passa pelo transdutor é a média das massas por segundo de ensaio, multiplicada pela média de velocidade no mesmo intervalo, dividida pelo comprimento da balança (0,475 m) e multiplicada pelo tempo total de ensaio. O princípio de análise dos dados segue o fluxograma mostrado na Figura 15.



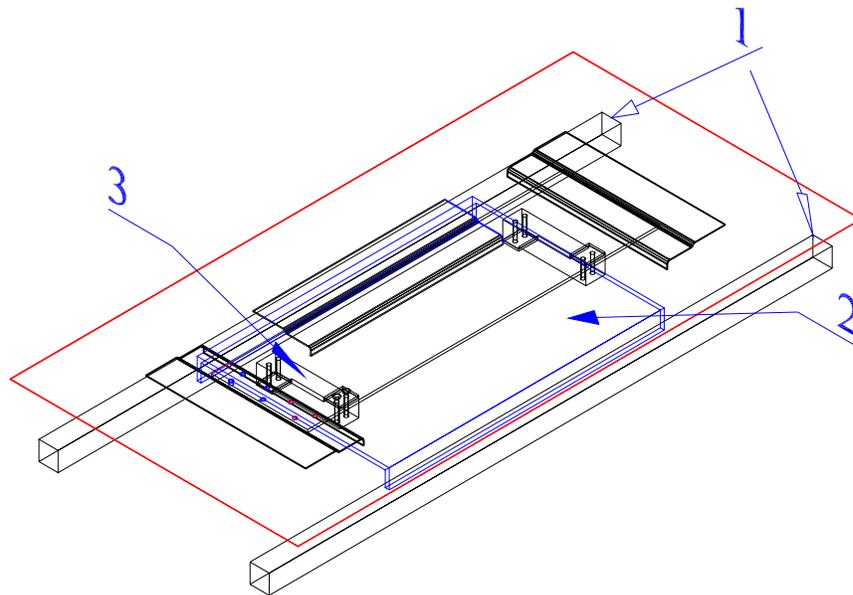
**Figura 15** - Etapas da análise dos dados feita pelo LabVIEW 5.1

#### 4.2.3 – Ensaios de Campo

Os ensaios de campo foram realizados na Usina Santa Adélia, localizada no município de Jaboticabal – SP, latitude  $21^{\circ}30'58,85''$ , longitude  $48^{\circ}17'31,35''$  e altitude 620 m, ao final do mês de outubro de 2000 e na Usina Cresciupal, localizada em Leme – SP, latitude  $22^{\circ}9'5,93''$ , longitude  $47^{\circ}14'57,00''$ , e altitude 639 m, em junho de 2001.

No início dos ensaios de campo, na Usina Santa Adélia, verificou-se que a concepção da balança, com quatro células de carga, usada em laboratório, não era suficientemente robusta para as condições de trabalho da colhedora. Houve sobrecarga nas células e estas foram danificadas. Outro problema encontrado foi quanto a fixação destas células na placa de pesagem. Os parafusos utilizados soltaram-se durante a colheita, devido à vibração, sendo cisalhados pelo impacto destes com as taliscas da esteira o que foi outra causa de danos às

células. Fez-se necessário, então, re-projetar o dispositivo de medição evidenciando uma maior robustez da mesma. No novo projeto optou-se por reduzir o número de células de carga. Foram utilizadas duas células modelo GL-20 da ALFA INSTRUMENTS, com fundo de escala de 20 kg, facilitando o monitoramento de suas possíveis falhas. A fixação das células também foi alterada objetivando uma balança mais robusta e confiável, como mostra a Figura 16. As barras de fixação (1) da balança podem agora ser soldadas na estrutura da colhedora sem que as células de carga (3) estejam montadas, sendo que o espaçamento entre elas e suas corretas alturas em relação ao fundo da esteira da colhedora agora garantidos pela chapa (2). O projeto permite ainda que as células de carga sejam montadas ou retiradas do dispositivo sem que haja a necessidade de remover toda sua estrutura.



**Figura 16** - Esquema da segunda configuração da balança com duas células de carga. (1) barra de fixação; (2) chapa de suporte; (3) célula de carga.

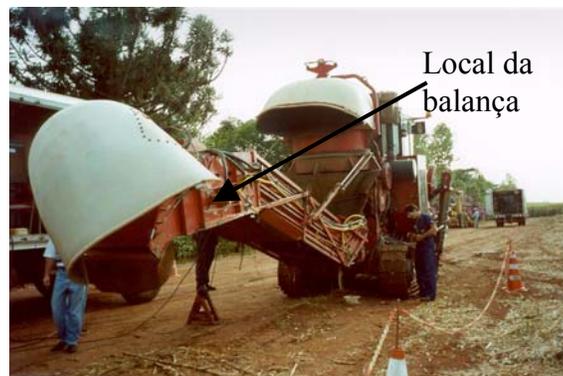
O sistema de montagem feito de baixo para cima garante ainda que mesmo que os parafusos de fixação venham a se soltar por vibração estes não teriam como entrar em contato com a parte móvel da esteira da colhedora.

A montagem da balança e do sensor foi feita de maneira semelhante àquela feita em laboratório ou seja, a balança foi fixada no alto do elevador, onde sua inclinação é menor, Figura 17. O sensor de proximidade, usado para determinação da velocidade das taliscas, foi fixado em um orifício feito na parede do elevador, como mostra a Figura 18.

Para validação da aquisição dos dados feita pelo sistema automático de medição, foi feita a pesagem das cargas dos caminhões na Usina e em um dos talhões colhidos, utilizou-se a carreta instrumentada da COPERSUCAR (PIEROSSI & HASSUANI, 1997) como transbordo.

Nos ensaios realizados na Usina Cresciunal, na safra de 2001, a metodologia utilizada foi basicamente a mesma. Para reduzir as fontes de erro detectadas no primeiro ensaio optou-se por desligar extrator secundário da colhedora, garantindo assim que toda a massa que passou sobre o transdutor foi descarregada no caminhão.

Durante os primeiros ensaios na Usina Santa Adélia e em todos os ensaios da Usina Cresciunal foram detectados problemas na utilização do sensor de proximidade, que não puderam ser sanados, mas comparando-se com ensaios onde este sensor funcionou, pôde-se observar que o cálculo da velocidade poderia ser feito pelos picos de massa, dispensando o seu uso, sem que isto acarretasse danos para a qualidade da aquisição ou análise dos dados.



**Figura 17** – Indicação do posicionamento da balança no elevador da colhedora



**Figura 18** - Detalhe externo e interno da fixação do sensor de proximidade no elevador da colhedora

Todos os cabos das células de carga e do sensor de proximidade foram colocados dentro de um conduíte e levados até a cabina da colhedora, onde estavam colocados a placa de aquisição de dados, o microcomputador e o GPS. A antena do GPS e a de rádio foram colocadas sobre a cabina da colhedora, sendo que a primeira estava centralizada na colhedora.

A aquisição dos sinais de geo-referenciamento da colhedora foi feita com correção diferencial. Para tanto se instalou o receptor GPS AgGPS132 na colhedora e o outro receptor GPS base AgGPS122 que recebe os sinais e transmite a correção por frequência de rádio, foi colocado em local fixo de posição conhecida. O receptor 132, por meio de um algoritmo interno a partir dos sinais recebidos do satélite e do receptor 122 calcula um fator de correção, e atualiza os dados do receptor móvel em tempo real, antes de armazená-los. A frequência de aquisição dos dados de posicionamento foi de 1 Hz.

#### 4.2.3.1 – Caracterização das áreas colhidas

Na Usina Santa Adélia, foram colhidos dois talhões de cana-de-açúcar queimada, de aproximadamente 0,15 e 0,33 ha, sendo que ambos, apresentavam canas tombadas, sendo isto mais evidente no segundo talhão colhido, conforme representam as Figuras 19 e 20.



**Figura 19**– Detalhe das condições do canavial do primeiro talhão colhido na Usina Santa Adélia



**Figura 20** – Colhedora e transbordo do primeiro talhão colhido

A segunda área colhida teve o acompanhamento de uma carreta de transbordo instrumentada da COPERSUCAR, descrita anteriormente no Capítulo 3, que é uma caçamba de báscula superior montada sobre quatro células de carga de compressão, que permite a leitura da carga total da caçamba independente da distribuição desta em seu interior (Figura 21), o que permitiria a comparação dos dados por linha colhida.



**Figura 21** – Colhedora e transbordo da COPERSUCAR do segundo talhão colhido

O talhão colhido na Usina Cresciumal, de cana queimada, de 0,29 ha, variedade SP8350-73, estava no terceiro corte com 12,6 meses de idade, Figura 22.



**Figura 22** – Colhedora e transbordo do talhão colhido na Usina Cresciunal

#### *4.2.4 – Análise dos dados dos ensaios de campo*

##### *4.2.4.1 – Filtragem dos sinais*

Da mesma forma que nos ensaios de laboratório, utilizou-se um filtro analógico Butterworth tipo passa-baixa de 2<sup>a</sup> ordem, com frequência de corte ( $f_c$ ) de 7 Hz, que é maior do que a frequência de passagem das massas a serem pesadas, 3,78 Hz, e menor que a frequência da vibração mecânica e dos ruídos elétricos.

##### *4.2.4.2 – Análise dos dados*

As análises dos dados dos ensaios de campo foram feitas de maneira semelhante àquela feita para os ensaios de laboratório, que esta descrita no fluxograma mostrado pela Figura 15. Os dados, em kg, no campo referem-se a uma área, que foi calculada com base na velocidade média de deslocamento da colhedora ( $4,47 \text{ km h}^{-1}$ ), na frequência de aquisição da localização da colhedora dada pelo GPS (1 Hz), e pelo espaçamento entre linhas (1,40 m). Ao dividir os dados em kg por esta área,  $1,75 \text{ m}^2$ , obtém-se a produtividade por área e esta é utilizada no GIS IDRISI32 para obtenção dos mapas de rendimento.

#### *4.2.5 – Mapas de rendimento*

Os mapas de rendimento dos talhões foram feitos no SIG IDRISI 32 for Windows. A partir de arquivos em formato TXT, do tipo XYZ, onde X e Y são os dados de

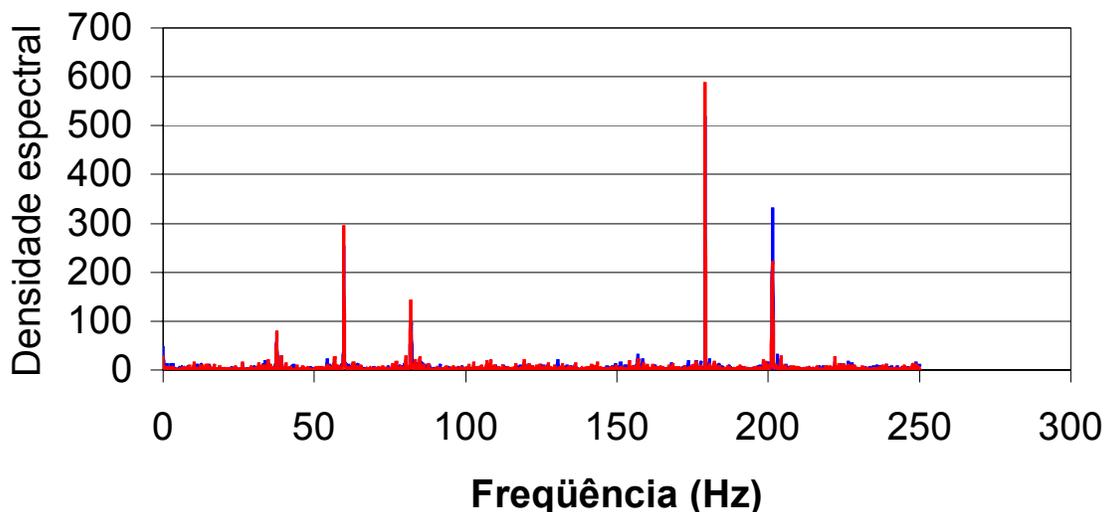
posicionamento, dados pelo GPS, e Z a produtividade. Realiza-se a conversão dos dados de posicionamento de lat-long, dado em graus, para utm-23s, dado em metros. Obteve-se então um mapa em formato vetorial das áreas colhidas.

Como o software interpola toda a área de trabalho, é preciso isolá-la e para tanto é necessário criar uma máscara, por meio dos pontos de limites da área colhida, em formato raster, atribuindo valor 1 para a área colhida e 0 para o restante da área de trabalho do SIG. Fazendo a sobreposição do mapa com a máscara, ou seja multiplicando os valores do mapa pelos valores da máscara, sendo que na área colhida, permanece os valores do mapa (multiplicação por 1), enquanto que nas demais áreas o valor se torna 0 (multiplicação por 0).

Na utilização da geo-estatística, primeiro calculou-se um semivariograma, para se analisar o quanto os dados variam ao longo do campo e após esse cálculo determinou-se o modelo que melhor se ajustava a ele para então realizar a Krigagem.

## V – RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para se decidir a taxa de amostragem adequada para a realização dos ensaios de campo, foi realizado um ensaio de campo preliminar, onde foi feito um estudo da frequência de vibração da esteira transportadora de uma colhedora de cana-de-açúcar com sistema de rolagem de esteiras metálicas trabalhando no campo. Observou-se que os principais modos de vibração da esteira transportadora ocorrem nas frequências de 40, 60, 80 180 e 200 Hz, como mostra a Figura 23. Portanto, optou-se por utilizar uma taxa de amostragem durante ensaios posteriores de 400 Hz que seria uma frequência distinta destas. Esta frequência é o dobro da maior frequência de vibração encontrada, e evita-se, desta forma, erros de *aliasing*.



**Figura 23** – Espectro de frequência da vibração da esteira da colhedora CAMECO CHT2500B

### 5.1 – Laboratório

#### 5.1.1 – Calibração das células de carga

##### 5.1.1.1 - Estática

Para as células de carga GL-10 da ALFA INSTRUMENTS, usadas no ensaio de laboratório, as curvas de calibração estática obtidas foram:

Célula 1:

$$y = 0.0004926364x + 0.0001477273$$

$$R^2 = 0.9996956884$$

Célula 2:

$$y = 0.0004704091x + 0.0002384091$$

$$R^2 = 0.9999916062$$

Célula 3:

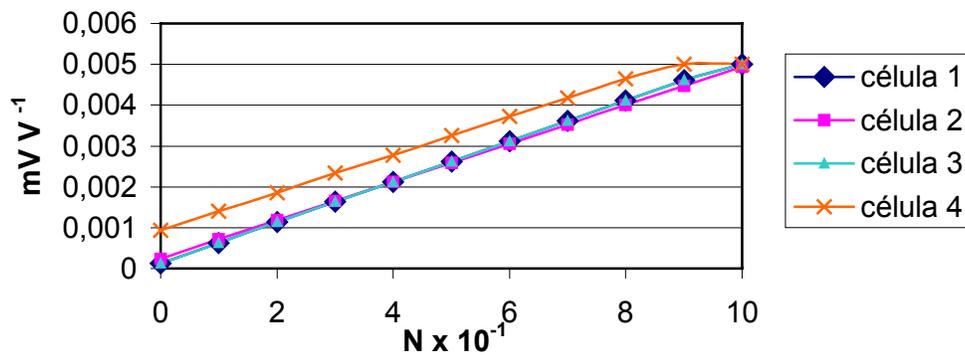
$$y = 0.0004927273x + 0.0001472727$$

$$R^2 = 0.9996903235$$

Célula 4:

$$y = 0.000458315x + 0.0009473818$$

$$R^2 = 0.9995103540$$



**Figura 24** – Curvas de calibração das células de carga usadas nos ensaios de laboratório

Enquanto que para as duas células de carga, modelo GL-20 da ALFA INSTRUMENTS, usadas nos ensaios de campo, as curvas de calibração estática foram:

Célula 1:

$$y = 0.000257279x + 0.000559904$$

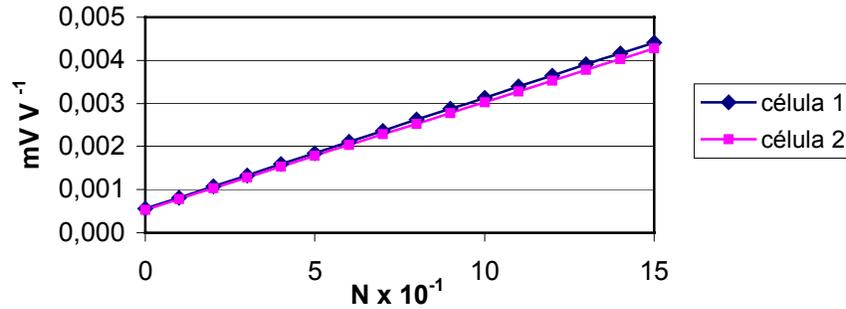
$$R^2 = 0.999998602$$

Célula 2:

$$y = 0.000249294x + 0.000532669$$

$$R^2 = 0.999999227$$

Onde x representa a peso em quilogramas-força e y o sinal dado em Volt.



**Figura 25** – Curvas de calibração das células de carga utilizadas nos ensaios de campo

As células de carga utilizadas tanto nos ensaios de laboratório como nos ensaios de campo não apresentaram histerese significativa.

#### 5.1.1.2 - Dinâmica

Na calibração dinâmica, a equação que rege o sinal de entrada do sistema é:

$$F(t) = 49 \left[ 1 - e^{-17,76t} (\cos(26,27t) + 0,6759 \sin(26,27t)) \right], \text{ onde:}$$

$F(t)$  é a força, em N, registrada pela célula de carga e  $t$  é o tempo em segundo.

A constante de elasticidade da célula é:

$$k = m \omega_n^2 = 49 \cdot (5,63)^2 = 49271 \frac{\text{N}}{\text{m}}$$

E o máximo deslocamento vertical da célula é:

$$\Delta x_{\max} = \frac{\Delta F}{k} = \frac{49 \text{ N}}{49271 \text{ N/m}} = 9,945 \cdot 10^{-4} \text{ m} = 0,9945 \text{ mm}$$

O comportamento da célula na curva de resposta é:

$$F(t) = 49 \cdot e^{-17,76t} [\cos(26,27t) + 0,6759 \sin(26,27t)]$$

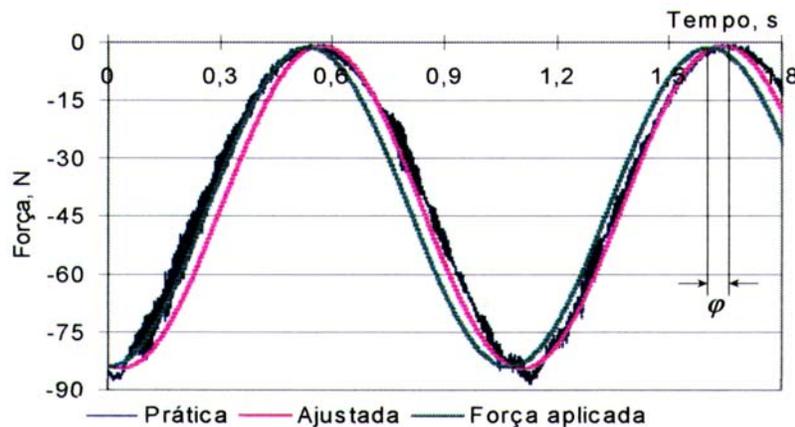
Assumindo que a força aplicada ao sistema é cossenoidal, a equação que representa esta força é:

$$F_0 = \frac{\Delta F}{2} \cdot \cos(\omega \cdot t) = 41,25 \cdot \cos(\omega \cdot t),$$

Para  $\omega = 5,63$  rad/s tem-se:

$$F(t) = -42,75 - 41,25 \cdot \left[ \frac{\cos(5,63 \cdot t - 0,2112)}{0,9878} \right]$$

Na Figura 26 observa-se o comportamento apresentado pela força aplicada (sinal de entrada), e a resposta do sistema, a partir dos dados obtidos na prática e o ajuste.

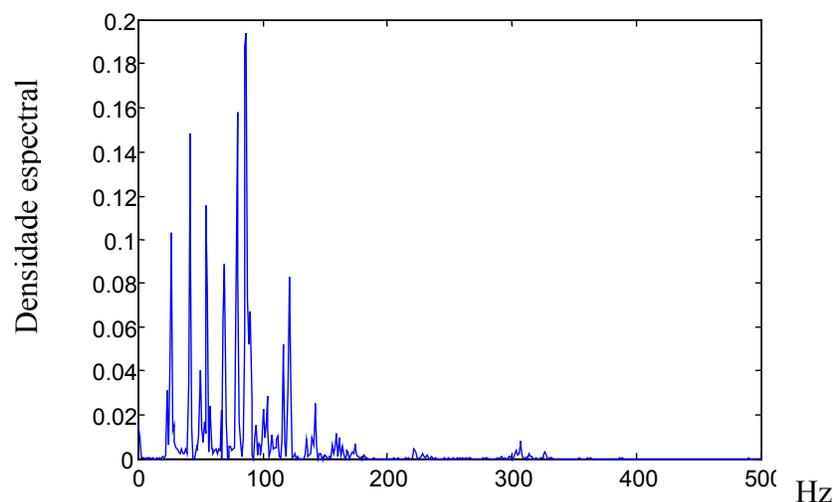


**Figura 26** – Gráfico da força aplicada (sinal de entrada) e da resposta do sistema (dados experimentais e ajustados do sinal de saída) para  $F(t)$

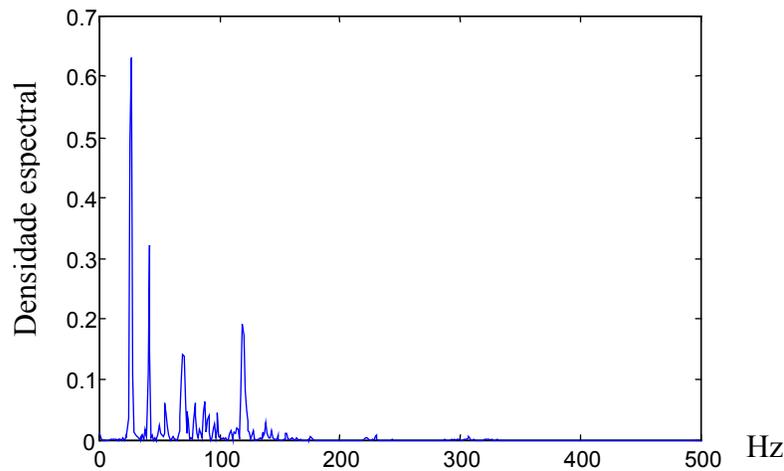
### 5.1.2 – Ensaios de laboratório

Durante os ensaios, utilizando-se o sistema de quatro células com aquisição pelo LabVIEW 5.1, notou-se que o nível de ruídos permanecia alto, o que gerou a necessidade da realização de um novo estudo das frequências do sistema.

Uma parte dos ruídos geravam frequências abaixo de 150 Hz, e foram atribuídas a ruídos elétricos, mas a maior parte foram ocasionados por vibrações mecânicas do sistema. Isto pode ser observado pela análise dos gráficos mostrados nas Figuras 27 e 28, onde pode-se notar que a amplitude dos ruídos elétricos são menores que à dos ruídos gerados pela vibração mecânica.



**Figura 27** – Gráfico do espectro de frequência dos ruídos elétricos



**Figura 28** - Gráfico do espectro de frequência das vibrações mecânicas e dos ruídos

Na Tabela 1 são mostradas as médias encontradas pelo programa desenvolvido para a aquisição de dados, de 15 ensaios conduzidos em laboratório, para as massas fixas de 1 kg (ensaios 1 a 5) e 2 kg (ensaios 6 a 15), que simulavam a passagem contínua destas massas.

**Tabela 1** – Médias obtidas durante ensaios em laboratório, utilizando-se pesos fixos simulando fluxo contínuo.

ENSAIO	tempo (s)	Massa Média medida (kg)	Massa Média real (kg)	CV (peso) (%)	Veloc. Média (m/s)	CV (veloc) (%)	Massa real (kg)	Massa calculada (kg)	erro (%)
1	4	0,98	1	0,17	0,96	4,97	8,08	7,92	1,86
2	4	0,97	1	0,09	0,96	5,16	8,10	7,91	2,33
3	4	0,98	1	1,53	0,79	1,22	6,69	6,52	2,48
4	4	0,99	1	0,78	0,80	0,29	6,75	6,70	0,70
5	4	0,98	1	1,97	0,92	9,10	7,72	7,56	2,01
6	5	1,95	2	0,20	0,84	1,26	17,76	17,33	2,41
7	4	1,95	2	0,06	0,82	1,51	13,74	13,40	2,52
8	6	1,96	2	0,17	0,85	4,78	21,45	20,97	2,22
9	4	1,95	2	0,18	0,85	5,09	14,40	14,07	2,26
10	4	1,95	2	0,15	0,85	5,90	14,29	13,95	2,40
11	4	1,96	2	0,15	0,83	0,64	13,92	13,63	2,13
12	6	1,95	2	0,30	0,84	1,25	21,19	20,70	2,29
13	6	1,95	2	0,28	0,86	4,70	21,68	21,15	2,44
14	6	1,95	2	0,09	0,87	8,53	21,86	21,26	2,71
15	5	1,95	2	0,13	0,88	5,86	18,50	18,06	2,40

CV – Coeficiente de variação.

As colunas 3 e 4, massa médias, referem-se as massa que simularam o fluxo homogêneo passando sobre a balança, enquanto que as colunas 8 e 9, são as massa que representam este fluxo no tempo dado pela coluna 2.

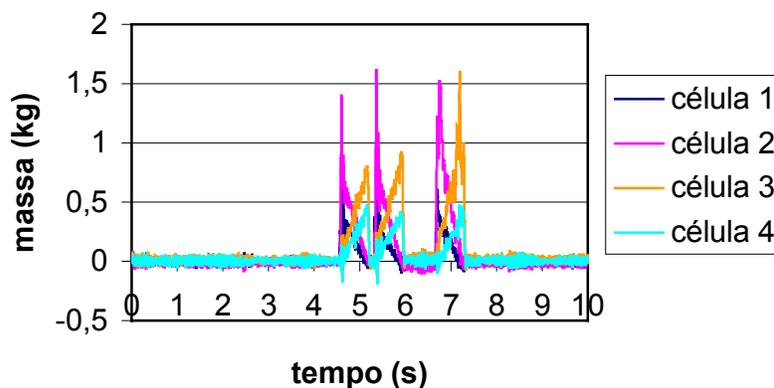
A Tabela 2 mostra os resultados de cinco ensaios, onde foram utilizados três corpos cilíndricos com massa de aproximadamente 1,5 kg cada.

**Tabela 2** - Médias obtidas durante ensaios em laboratório, utilizando-se corpos cilíndricos.

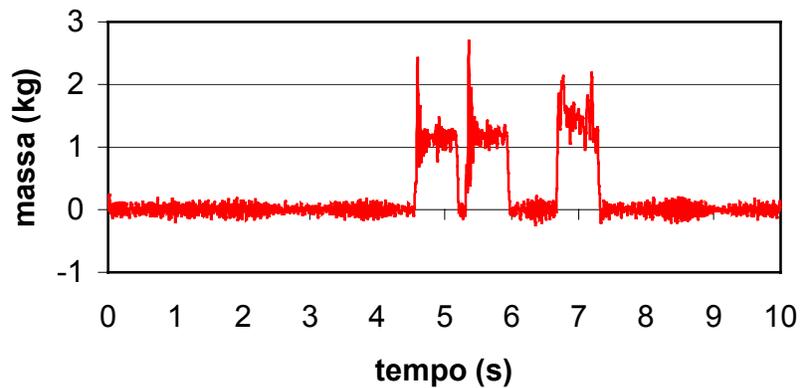
	Massa real	Massa calculada	Erro
ENSAIO	(N)	(N)	(%)
16	4,50	4,40	2,15
17	4,50	4,48	0,35
18	4,50	4,46	0,78
19	4,50	4,61	2,49
20	4,50	4,68	4,02

Observa-se um erro oscilando entre um mínimo de 0,70% e um máximo de 2,71% nos ensaios utilizando massas fixas, e de 0,35 % a 4,02 % nos ensaios onde utilizou-se a passagem de três corpos cilíndricos.

Os gráficos mostrados nas Figuras 29 e 30 mostram os sinais gerados pelas quatro células de carga e a soma das células respectivamente.



**Figura 29** - Sinais das quatro células de carga, em consequência da passagem de três corpos cilíndricos de aproximadamente 1,5 kg, filtrados a 7 Hz.

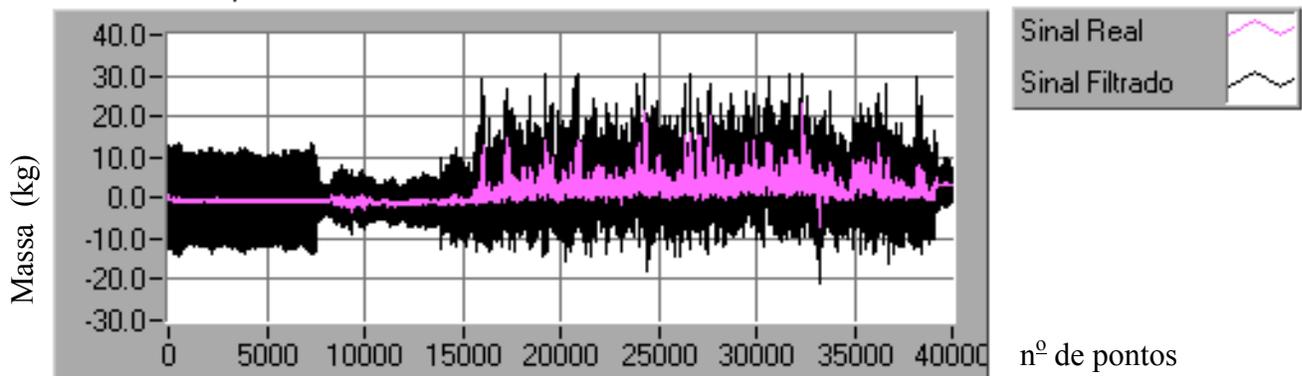


**Figura 30** – Gráfico da soma dos sinais das quatro células de carga filtrados a 7 Hz.

Com os resultados obtidos em laboratório pôde-se observar que o sistema estava apto a ser utilizado em campo, uma vez que as células de carga possuíam sensibilidade suficiente, como observado na Figura 29, onde percebe-se a entrada e a saída das massas cilíndricas sobre a balança, sendo que os erros obtidos foram considerados satisfatórios para o tipo de ensaio realizado, com o nível de vibração apresentado.

## 5.2 – Ensaio realizados na Usina Santa Adélia

Os resultados dos ensaios de campo antes e após a filtragem analógica pode ser observada na Figura 31.

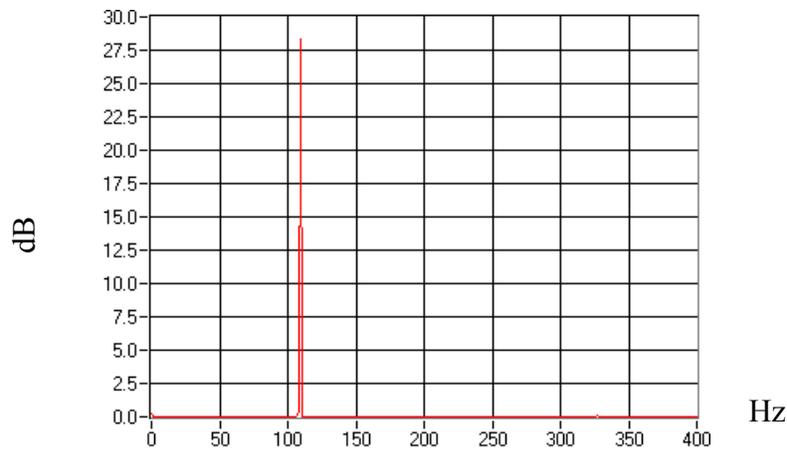


**Figura 31** – Sinal real e sinal filtrado sobrepostos, Butterworth de 2ª ordem

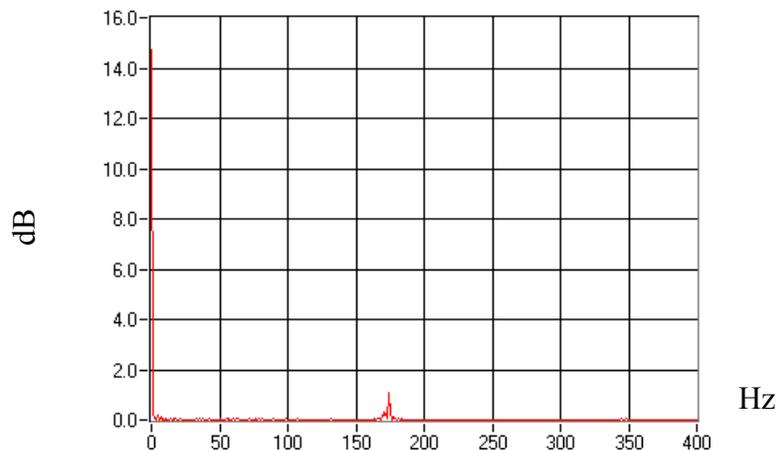
Este gráfico refere-se a colheita de uma linha. No início do ensaio a colhedora está em movimento, colhendo, mas a esteira está parada (pontos de 0 – 15000), em seguida ela continua colhendo e a esteira é acionada (pontos de 15000 – 39000). Ao final a colhedora

pára de colher e a esteira continua em movimento, até que todo o material colhido passe pelo sistema de passagem (pontos de 39000 – 40000).

As Figuras 32 e 33 apresentam o espectro de frequência dos ensaios, onde pode-se observar que próximo de zero aparece uma componente de frequência que representa o sinal de interesse e as outras componentes de frequência são devidos a ruídos elétricos e mecânicos.



**Figura 32** – Colhedora em movimento, cortando cana e esteira parada.



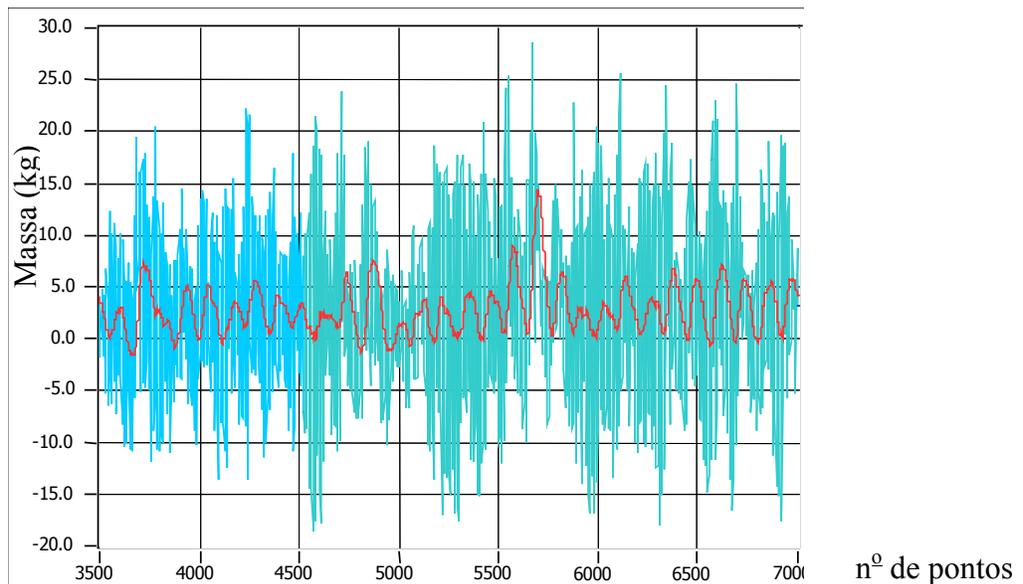
**Figura 33** – Colhedora em movimento, cortando cana e esteira em movimento.

A quantidade de cana colhida no primeiro talhão, na Usina Santa Adélia, foi de 31,2 Mg (peso do caminhão na usina, utilizando balança comercial para pesagem de veículos). Na pesagem realizada pelo sistema automático de medição (SAM) este valor foi de 27,3 Mg, o que representa uma diferença de 12,5 %. Os resultados computados por linha colhida são mostrados na Tabela 3. Neste ensaio não foi possível fazer a aquisição do sinal do sensor magnético pois este foi danificado durante a montagem da instrumentação, de forma que utilizou-se uma média da velocidade da esteira realizada posteriormente.

**Tabela 3** – Resultado por linha medido pelo sistema automático de medição do primeiro talhão colhido

<b>Linha colhida</b>	<b>Médias das massa (kg)</b>
1	2878,91
2	2995,2
3	2888,37
4	3035,15
5	2093,69
6	3089,32
7	1443,64
8	3049,42
9	3077,42
10	2716,04
<b>TOTAL</b>	<b>27267,16</b>

Na Figura 34 é mostrado o gráfico do sinal da soma das células de carga de um ensaio.



**Figura 34** – Sinal real (azul) e sinal filtrado (vermelho) do ensaio feito na primeira linha do primeiro talhão colhido

No segundo talhão colhido, as massas medidas pela usina são mostradas na Tabela 4.

**Tabela 4** – Resultado da pesagem dos caminhões e das carretas feita na usina

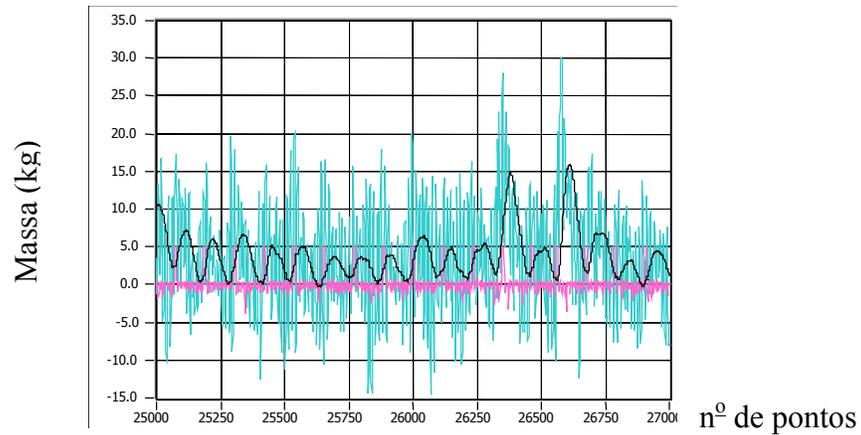
<b>CAMINHÃO</b> <b>massa (kg)</b>	<b>CARRETA</b> <b>massa (kg)</b>	<b>Massa</b> <b>(kg)</b>
13910	12860	26770
12090	13100	25190
14820	13450	28270
<b>TOTAL</b>		<b>80230</b>

A massa registrada pelo caminhão da COPERSUCAR e pelo sistema automático de medição (SAM), por linha colhida está na Tabela 5.

**Tabela 5** – Resultado registrado pelo caminhão da COPERSUCAR e pelo sistema automático de medição

<b>LINHA</b>	<b>COPERSUCAR</b> <b>massa (kg)</b>	<b>SAM</b> <b>massa (kg)</b>	<b>Erro (%)</b>
1	1315	1320	-0.38
2	3915	3198	18.31
3	4940	6356	-28.66
4	4675	4111	12.06
5	4890	erro	erro
6	4665	4685	-0.43
7	5410	5928	-9.57
8	4925	erro	erro
9	5370	4240	21.04
10	5675	4657	17.94
11	4905	4515	7.95
12	4915	5269	-7.20
13	5055	5265	-4.15
14	4395	3990	9.22
<b>TOTAL</b>	<b>65050</b>	<b>55316</b>	

Na Figura 35, está mostrado a soma dos sinais das duas células de carga e do sensor de proximidade do ensaio da linha 1.



**Figura 35** – Sinal real e filtrado das células de cargas e sinal do sensor de proximidade de um ensaio

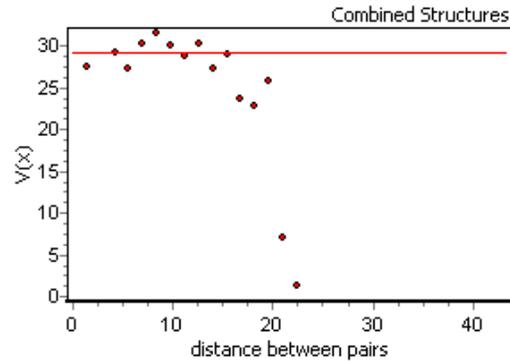
Pela Figura 35 pode-se observar que o sistema tem sensibilidade para registrar as diferenças de massa que estão sendo medidas, apesar dos erros encontrados durante os ensaios.

Durante a aquisição os dados foram armazenados em diversos arquivos, que eram finalizados ao final de uma linha ou quando o caminhão precisava descarregar.

A linha 1, menos extensa que as outras, foi colhida direta, sem interrupções e observou-se um erro muito pequeno, de 0,38 %. Em todas as demais linhas houveram paradas para descarga do caminhão e o erro apresentado aumentou, chegando a 28,66 %.

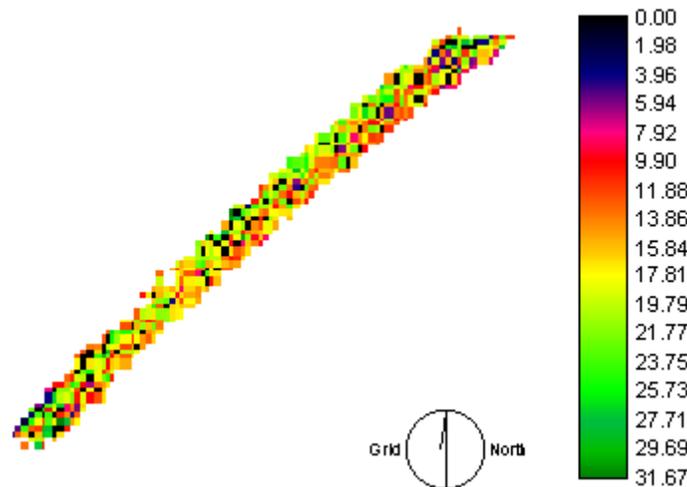
Nas linhas 5 e 8 houveram problemas durante a aquisição de dados. Na linha 5 uma das células de carga foi desconectada, enquanto que na linha 8 a bateria do microcomputador acabou, necessitando ligá-lo a uma fonte alimentada por uma bateria. Pelo fato do caminhão da COPERSUCAR ter uma capacidade pequena (aproximadamente de 3,8 t) em relação à extensão da linha colhida, as linhas foram colhidas com interrupções para descarregar o caminhão. Cada início de ensaio é uma fonte de erros, por problemas operacionais da colhedora, primeiro o operador aciona o cortador basal, percorrendo uma certa distância somente cortando, espera o caminhão se posicionar, para só então acionar a esteira. O ideal seria armazenar os dados de uma linha inteira em um arquivo, ou seja colher toda uma linha ininterruptamente, como foi feito no ensaio do primeiro talhão e na primeira linha do segundo talhão.

Para fazer a Krigagem dos dados primeiro determinou-se um semi-variograma médio. O modelo linear foi o único que o IDRISI32 foi capaz de ajustar, todos os outros não convergiram. Em alguns conjuntos de dados como o mostrado na Figura 36, observou-se um efeito pepita puro e portanto não existe dependência espacial, de forma que nestes casos não se pode aplicar a Krigagem e o mapa apresentado representa a produtividade da área.



**Figura 36** – Semivariograma com efeito pepita (nugget) = 29,2036

O mapa de produtividade obtido nos ensaios feitos na Usina Santa Adélia, no primeiro talhão, de 0,15 ha, está mostrado nas Figuras 37, onde cada pixel equivale a aproximadamente 2 m<sup>2</sup>.



**Figura 37** - Mapa do primeiro talhão colhido na Usina Santa Adélia - dados reais rasterizados (unidades em kg m<sup>-2</sup>)

Para os dados do segundo talhão, como as diferenças entre os dados do SAM e da carreta da COPERSUCAR eram grandes, optou-se por não apresentá-los na forma de mapa.

### 5.3 – Ensaio realizados na Usina Cresciumal

O resultado dos ensaios realizados na safra de 2001 na Usina Cresciumal é mostrado na Tabela 6.

**Tabela 6** - Resultado registrado pela Usina Cresciumal e pelo sistema automático de medição

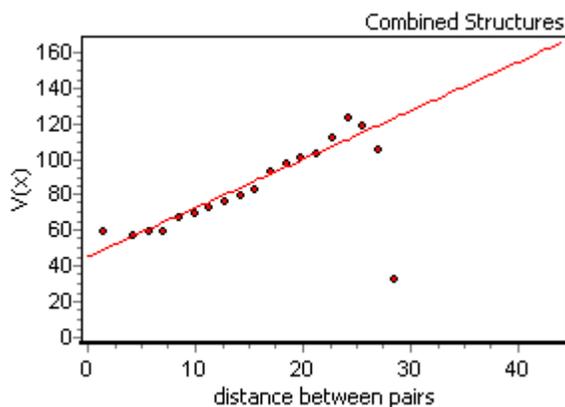
	<b>SAM</b>	<b>USINA</b>	<b>Erro</b>	<b>FC</b>
<b>CARGA</b>	<b>Massa</b>	<b>Massa</b>	<b>(%)</b>	
	<b>(kg)</b>	<b>(kg)</b>		
1	11243,31	15720	28,48	0,72
2	10820,36	16390	33,98	0,66
3	10023,66	12870	29,43	0,71
4	8068,79	12320	34,51	0,65
5	11060,44	16120	31,39	0,69
6	11212,78	15940	29,66	0,70
7	9197,71	13070	29,63	0,70
8	8322,26	11500	27,63	0,72

Como os ensaios apresentaram um erro em torno de 30,6 %, pode-se considerar este, como um erro sistemático do sistema e portanto utilizou-se este valor como um fator de correção (FC) para os ensaios, tendo em vista que não foi realizado um ensaio para calibração com cargas reais tal qual recomendado para colhedoras de cereais. O valor médio do FC utilizado em todos os ensaios foi de 0,69. Estes resultados são apresentados na Tabela 7.

**Tabela 7** - Resultado corrigido registrado pela Usina Cresciunal e pelo sistema automático de medição

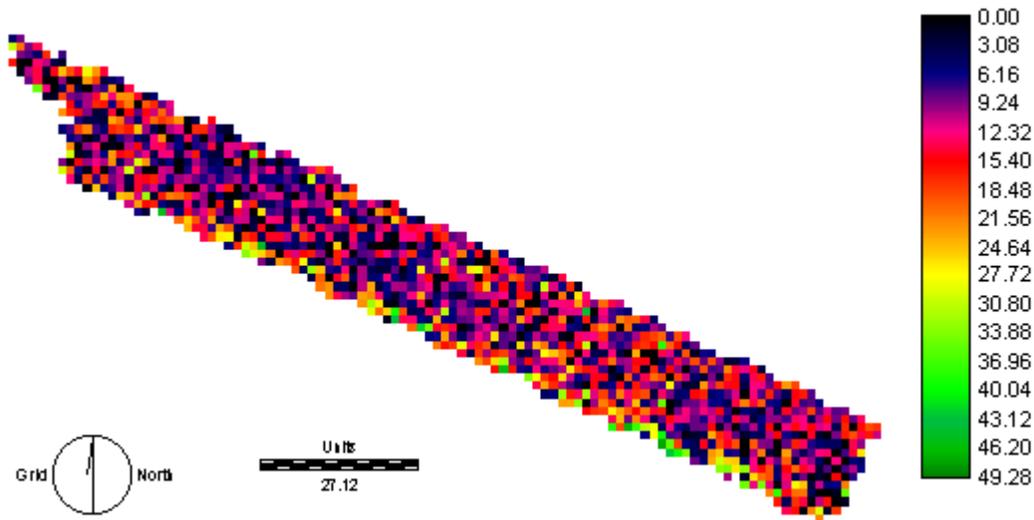
	SAM	USINA	Erro
CARGA	Massa (kg)	Massa (kg)	(%)
1	16294.66	15720	-3.66
2	15681.69	16390	4.32
3	13162.45	12870	-2.27
4	11693.9	12320	5.08
5	16029.62	16120	0.56
6	16250.41	15940	-1.95
7	13330.02	13070	-1.99
8	12061.24	11500	-4.88

O semivariograma médio e a curva ajustada dos ensaios realizados na Usina Cresciunal está mostrado na Figura 38, e foram utilizados na realização da Krigagem.

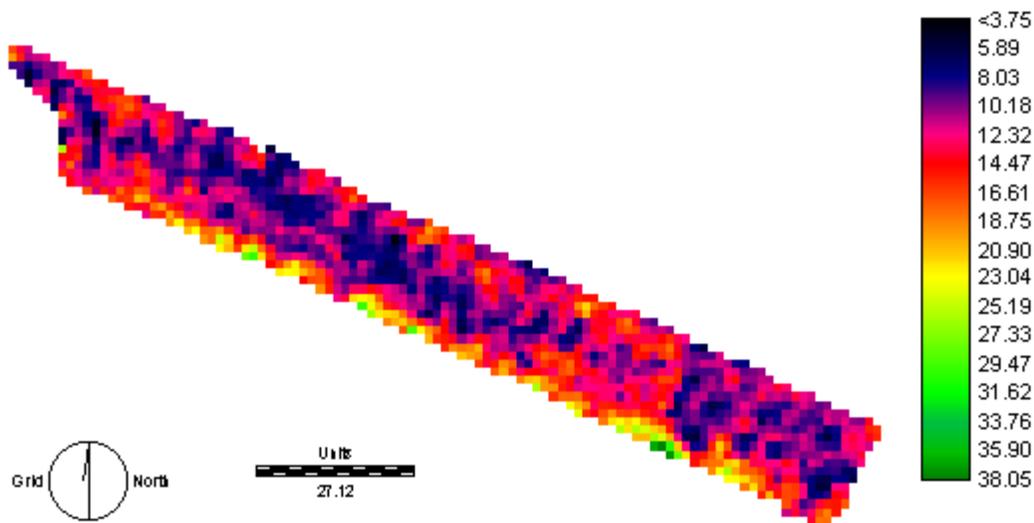


**Figura 38** – Semivariograma ajustado pelo modelo linear, onde  $x = 0$ ;  $y = 2,72992$  e o efeito pepita (nugget) = 45,379

Os mapas de rendimento obtido durante os ensaios na Usinas Cresciunal estão mostrados nas Figuras 39 a 43. Cada pixel, nos mapas, representa a área de 2 m<sup>2</sup>, onde a área de estudo foi de 0,29 ha.



**Figura 39** – Mapa do talhão colhido na Usina Cresciumal – dados reais rasterizados (unidades em  $\text{kg m}^{-2}$ )



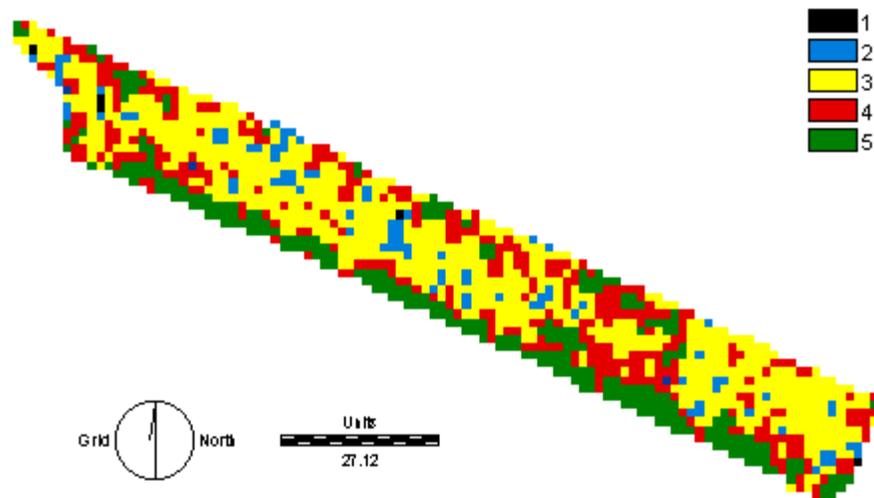
**Figura 40** - Mapa do talhão colhido na Usina Cresciumal com Krigagem – corrigido pelo FC 0,69 (unidades em  $\text{kg m}^{-2}$ )

Pela análise dos mapas mostrados pelas Figuras 39 e 40, pode-se observar que houve uma atenuação de alguns dados do mapa original após a interpolação pelo método da Krigagem, mas a tendência dos mapas é a mesma em ambos os casos.

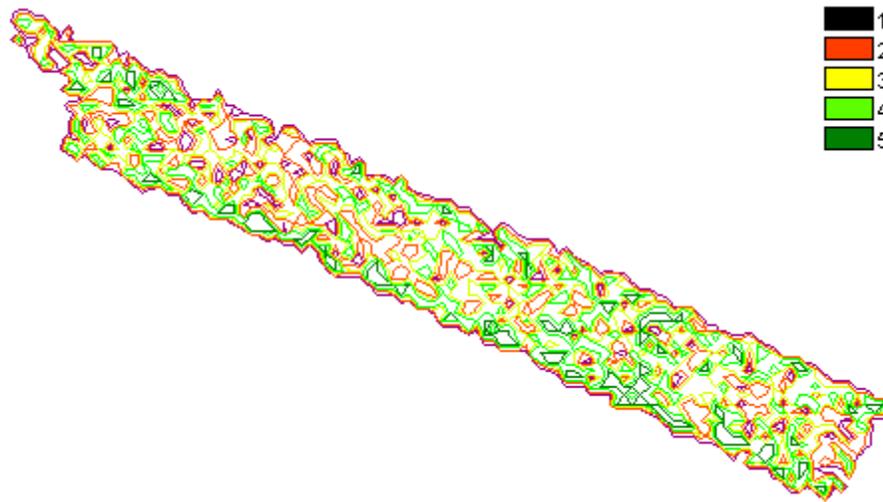
Utilizando-se a Tabela 8 com referência para reclassificação, agrupamos os resultados em classes e apresentamos na Figura 41.

**Tabela 8** –Valores da reclassificação

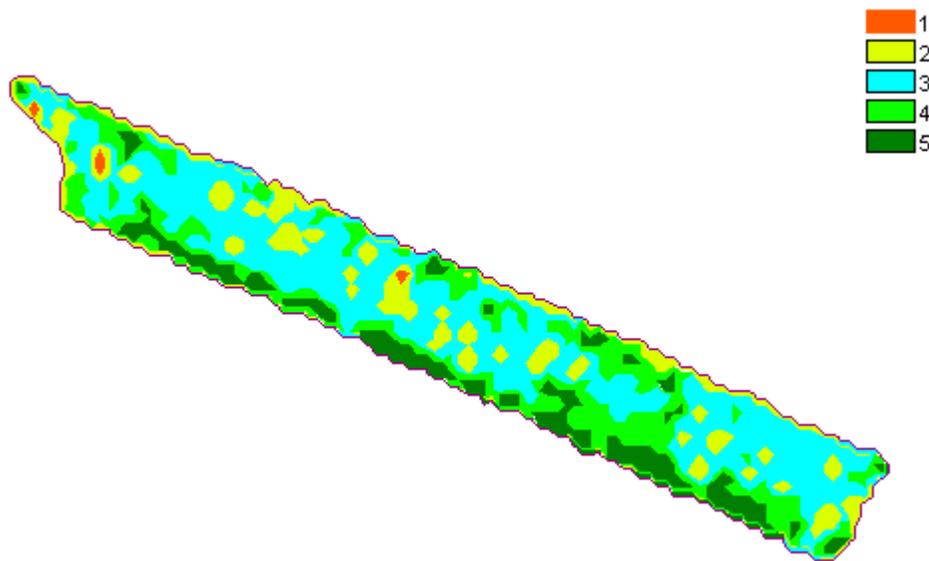
Classe	kg m <sup>-2</sup>
1	$0 \leq x < 5,0$
2	$5,0 \leq x < 7,5$
3	$7,5 \leq x < 12,0$
4	$12,0 \leq x < 15,0$
5	$x \geq 15,0$



**Figura 41** - Mapa do talhão colhido na Usina Cresciumal com Krigagem – corrigido pelo FC 0,69 – reclassificado



**Figura 42** – Mapa de contorno do talhão colhido na Usina Cresciumal, baseado nos dados reais. Intervalos de classificação conforme Tabela 8



**Figura 43** – Mapa de contorno do talhão colhido na Usina Cresciumal após a Krigagem. Intervalos de classificação conforme Tabela 8.

Os valores das legendas dos mapas reclassificado e de contorno são os mesmos mostrados na Tabela 8.

**Tabela 9** – Relação entre classe e área colhida do mapa Krigado da área colhida na Usina Cresciumal (Figura 41).

<b>Classe</b>	<b>% área</b>
1	0,35
2	6,38
3	48,47
4	24,76
5	20,04
Total	100,00

Pode-se observar, pelo mapa mostrado na Figura 41 e pela Tabela 9, que a classe 3, que representa os valores entre 75 e 120 t/ha é a mais representativa com 48,47 % da área colhida. Isto pode ser evidenciado também na Figura 43 que mostra um vetor de contorno isolando as ilhas de cada produtividade. Observa-se que as classes 1 e 2 surgem em pontos isolados formando ilhas de baixa produtividade, cujas razões devem ser investigadas em trabalhos futuros.

## VI – CONCLUSÕES

A partir dos resultados obtidos pôde-se fazer algumas considerações a respeito do sistema de medição proposto:

- ✓ O sistema de medição proposto atende as expectativas do trabalho, uma vez que o erro estimado está na faixa de 5 %, como mostram os ensaios de campo feitos na Usina Cresciumal;
- ✓ É necessário calibrar o sistema de pesagem ao início de cada ensaio, para determinar preliminarmente o fator de correção;
- ✓ O sistema é sensível o suficiente para registrar as diferenças de pesos das canas-de-açúcar que estão sendo colhidas, apesar dos erros encontrados durante os ensaios;
- ✓ O mapa de rendimento gerado indica as tendências e os locais de diferentes produtividades;
- ✓ Este trabalho mostra a viabilidade de se aplicar técnicas de Agricultura de Precisão na colheita de cana-de-açúcar, mas ainda é necessário um aprimoramento dos mecanismos de pesagem, do software utilizado, bem como de um *display* a ser colocado na colhedora para que o equipamento se torne comercial.

## **VII – SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

- 1) A experiência durante este trabalho mostrou que a cultura de cana-de-açúcar é muito agressiva, e portanto os componentes utilizados precisariam ser mais robusto para ter uma maior durabilidade, e reduzir a perda de dados durante os ensaios.
- 2) Para a AP realmente ser implantada é necessário agora correlacionar os dados de produtividade obtidos com o auxílio do SAM, com outras informações relativas ao solo, como por exemplo, teor de água, presença de pragas e doenças etc. que podem afetar a produtividade da cana-de-açúcar.
- 3) A colhedora de cana-de-açúcar apresenta particularidades durante o seu funcionamento, tais como: parada por embuchamento, parada da esteira para troca de veículo de transbordo, manobras em cabeceira do talhão etc. Em um trabalho futuro é necessário que se monitore melhor o funcionamento da colhedora, aumentando o número de informações que são fornecidas ao programa de aquisição e de análise de dados para permitir a elaboração de mapas de produtividade mais confiáveis.

## VIII - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGCO, Fieldstar - The science of agriculture, [www.fieldstar.dk](http://www.fieldstar.dk), agosto de 1998.

BALASTREIRE, L.A. Potencial de utilização dos conceitos de agricultura de precisão na cultura da cana-de-açúcar. **S.T.A.B.**, Piracicaba, v.16, n.4, p.22-26, 1998.

BENTLEY, J. P., **Principles of measurement systems**, 3ª edição, Cingapura, Longman Group Limited, 1995, 468p.

BILLER, R.C., SOMMER, C., Reduced input of herbicides in plant production by use of optoelectronics sensors, In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON AGRICULTURAL ENGINEERING, 1996, Madri. **Proceedings...** European Society of Agricultural Engineers, v.2, p.799-800, 1996.

BLACKMORE, S., Precision Farming; An Introduction. **Outlook on Agriculture**, Oxon, v.23, n.4, p.275-280, 1994.

BLACKMORE, S., MARSHALL, C., Yield Mapping; Errors and Algorithms, In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON PRECISION AGRICULTURE, 3. 1996, Proceedings... Minneapolis, p.403-415, 1996.

BRAMLEY, R.G.V., COOK S.E., MCMAHON, Yield Mapping – Current Capabilities in Yield Mapping for Sugar Cane, Are These Limiting to the Introduction of PA to the Sugar Industry?, **Workshop...** Townsville, 6p.,10-12 junho de 1997.

BRAMLEY, R.G.V., QUABBA, R.P., Opportunities for Improving the Management of Sugarcane Production through the Adoption of Precision Agriculture – An Australian Perspective, Glen Osmond, 1999.

CASE IH AGRICULTURE EQUIPMENT, Advanced Farming Systems, [www.casecorp.com/agricultural/afs/index.html](http://www.casecorp.com/agricultural/afs/index.html), janeiro de 1999.

COSTA, E A. Gazeta Mercantil Página B14 – 05/09/2001.

COX, G., HARRIS, H., PAX, R., DICK, R. Monitoring cane yield by measuring mass flow through the harvester. In: PROCEEDINGS OF AUSTRALIAN SOCIETY OF SUGAR CANE TECHNOLOGISTS CONFERENCE, 18, 1996. Mackay **Proceedings...** Australian Society of Sugar Cane Technologists, Brisbane: Watson Ferguson, 1996.

COX, G., HARRIS, H., PAX, R. Development and testing of a prototype yield mapping system. In: PROCEEDINGS OF AUSTRALIAN SOCIETY OF SUGAR CANE TECHNOLOGISTS, 1997. **Proceedings...** Australian Society of Sugar Cane Technologists, Brisbane. p. 38-43, 1997.

EARL, R., WHEELER, P.N., BLACKMORE, B.S., GODWIN, R.J., Precision farming – the management of variability. **The Journal of the Institution of Agricultural Engineers**, v. 51, n.4, p.18-23, Silsoe, 1996.

ELIAS, Alexandre Ismael, **Mapeamento da colheita mecanizada de grãos utilizando um sistema de posicionamento global**. 75p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queirós, USP. Piracicaba, 1998.

FEKETTE, A., FÖLDESI, I., KOVACS, L., SERES, L., Application rate control for precision farming, In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON AGRICULTURAL ENGINEERING, 1996, Madri. **Proceedings...** European Society of Agricultural Engineers. v.2, p.1085-1086. 1996.

JOHN DEERE, Precision Farming, [www.deere.com/greenstar](http://www.deere.com/greenstar), agosto de 1998.

JOHNSON, R.C., Target farming: A practical guide to precision farming concepts and technology. 1996.

KORTE, H., YULE, I.J., A comparison of differential global positioning system for use in precision farming. In INTERNATIONAL CONFERENCE ON AGRICULTURAL ENGINEERING, 1996, Madri. **Proceedings...** European Society of Agricultural Engineers, 1996. v.2, p.1021-1022.

MAGALHÃES, P.S.G., BRAUNBECK, A.O., Colheita de cana-de-açúcar – Atualidade e perspectiva, In CONGRESO LATINOAMERICANO DE INGENIERÍA RURAL, 1998, La Plata. **Memórias...** Ingeniería Rural y Mecanización Agraria en el ámbito Latinoamericano, p.262-273, 1998.

MARTÍNEZ DE GUERENU, C., GERMANIN, C. LAVIALLE, O., GRENIER, G., Designing of an automatic counting system for wheatears, In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON AGRICULTURAL ENGINEERING, 1996, Madri. **Proceedings...** European Society of Agricultural Engineers, 1996. v.1, p.181-182.

MORGAN, M., ESS, D., The Precision-Farming for Agriculturists. Publicado por John Deere Publishing, 1ª ed., Illinois, 1997.

PIEROSI, M.A., HASSUANI, S.J. Caçamba instrumentada para pesagem de cana picada. In: SEMINÁRIO COPERSUCAR DE TECNOLOGIA AGRONÔMICA, 7, 1997, Piracicaba. Anais... São Paulo Copersucar, p. 263-265, 1997

REVISTA EXAME. São Paulo em números, São Paulo, 1998, ed.658, Caderno Especial, 30p.

RIPOLI, T.C., OMETTO, D.A., Techniques implications in the adoption of the raw sugar cane, In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON AGRICULTURAL ENGINEERING, 1996, Madri. **Proceedings...** European Society of Agricultural Engineers. v.2, p. 309-310, 1996.

ROCHA, J.V., Agricultura de precisão e monitoramento da fertilidade do solo, Campinas, 1998. 7p. Notas internas não publicadas – Faculdade de Engenharia Agrícola - Universidade Estadual de Campinas.

SANAEI, A., YULE, I.J., Accuracy of yield mapping systems: the effects of combine harvester performance, In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON AGRICULTURAL ENGINEERING, 1996, Madri. **Proceedings...** European Society of Agricultural Engineers, v.2, p.1001-1002, 1996.

SARAIVA, Antonio Mauro, CUGNASCA, Carlos Eduardo, PAZ, S.M., O problema da padronização e da integração de sistemas na Agricultura de Precisão. In: **Congresso e Feira para Usuários de Geoprocessamento da América Latina**, 4. Curitiba, 1998. GIS Brasil-98: geoinformação no campo e na cidade. São Paulo: Sagres, 1998. CD-Rom

SARFAS, B. Electronics: The importance in world food production. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON AGRICULTURAL ENGINEERING, 1996, Madri. **Proceedings...**European Society of Agricultural Engineers. v.1, p.5-12, 1996

SCHNEIDER, S. M., RAWLINGS, S. L., HAN, S. EVANS, R. G., CAMPBELL, R. H., Precision agriculture for potatoes in the Pacific Northwest. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON AGRICULTURAL ENGINEERING, 1996, Madri. **Proceedings...** European Society of Agricultural Engineers. v2, p. 443-452, 1996

SEADE, [www.seade.gov.br/cgi-bin/dirasv98/sensor\\_01.ksh?](http://www.seade.gov.br/cgi-bin/dirasv98/sensor_01.ksh?), outubro de 2001.

STTAFORD, J.V., BOLAM, H.C., Improving reability of position resolution using GPS for precision agriculture, In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON AGRICULTURAL ENGINEERING, 1996, Madri. **Proceedings...** European Society of Agricultural Engineers. v.2, p. 985-986, 1996

THYLÉN, L., Consistency in yield variations and optimal fertilizer rate. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON AGRICULTURAL ENGINEERING, 1996, Madri. **Proceedings...** European Society of Agricultural Engineers, 1996. v.1, p.107-108.

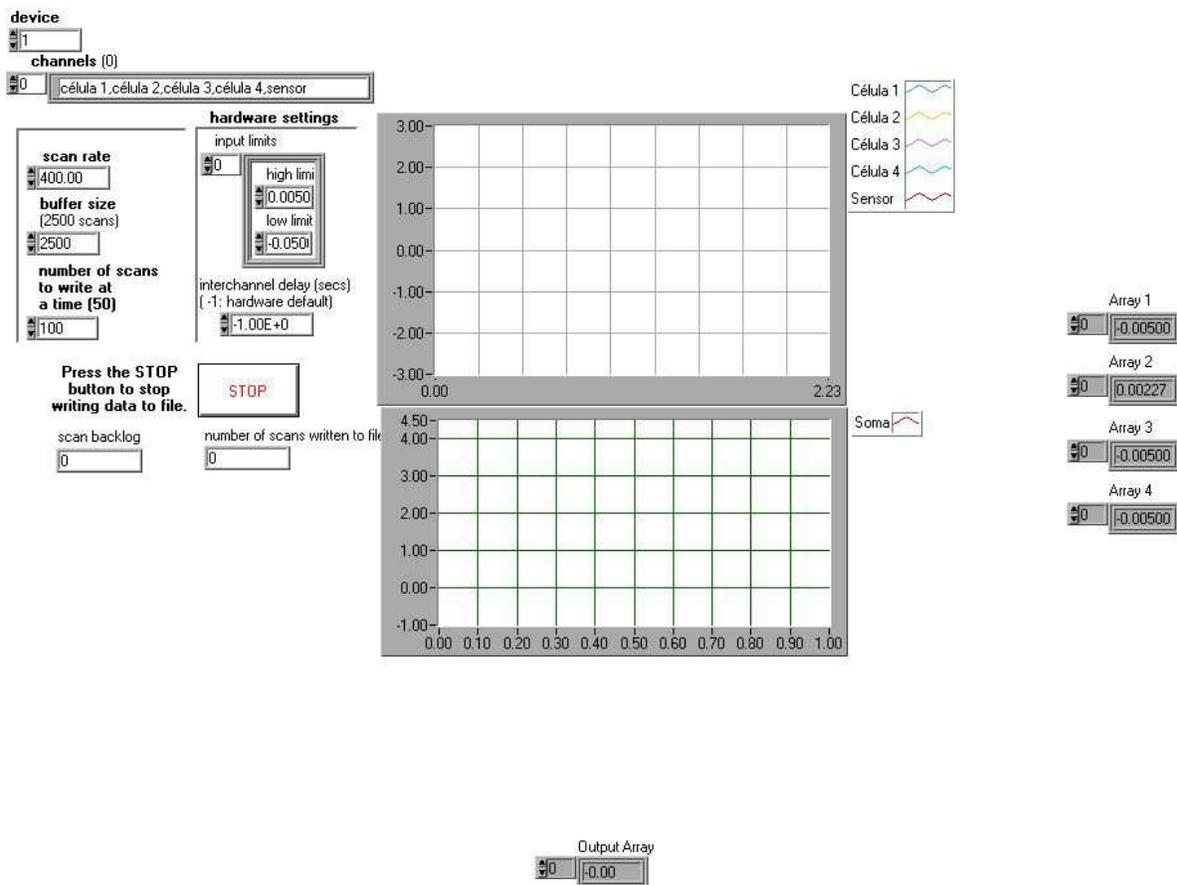
WALTER, J. D., HOFMAN, V. L., BACKER, L. F., Site-Specific Sugarbeet Yield Monitoring. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON AGRICULTURAL ENGINEERING, 1996, Madri. **Proceedings...** European Society of Agricultural Engineers. v.2, p.834-844. 1996

*ANEXOS*

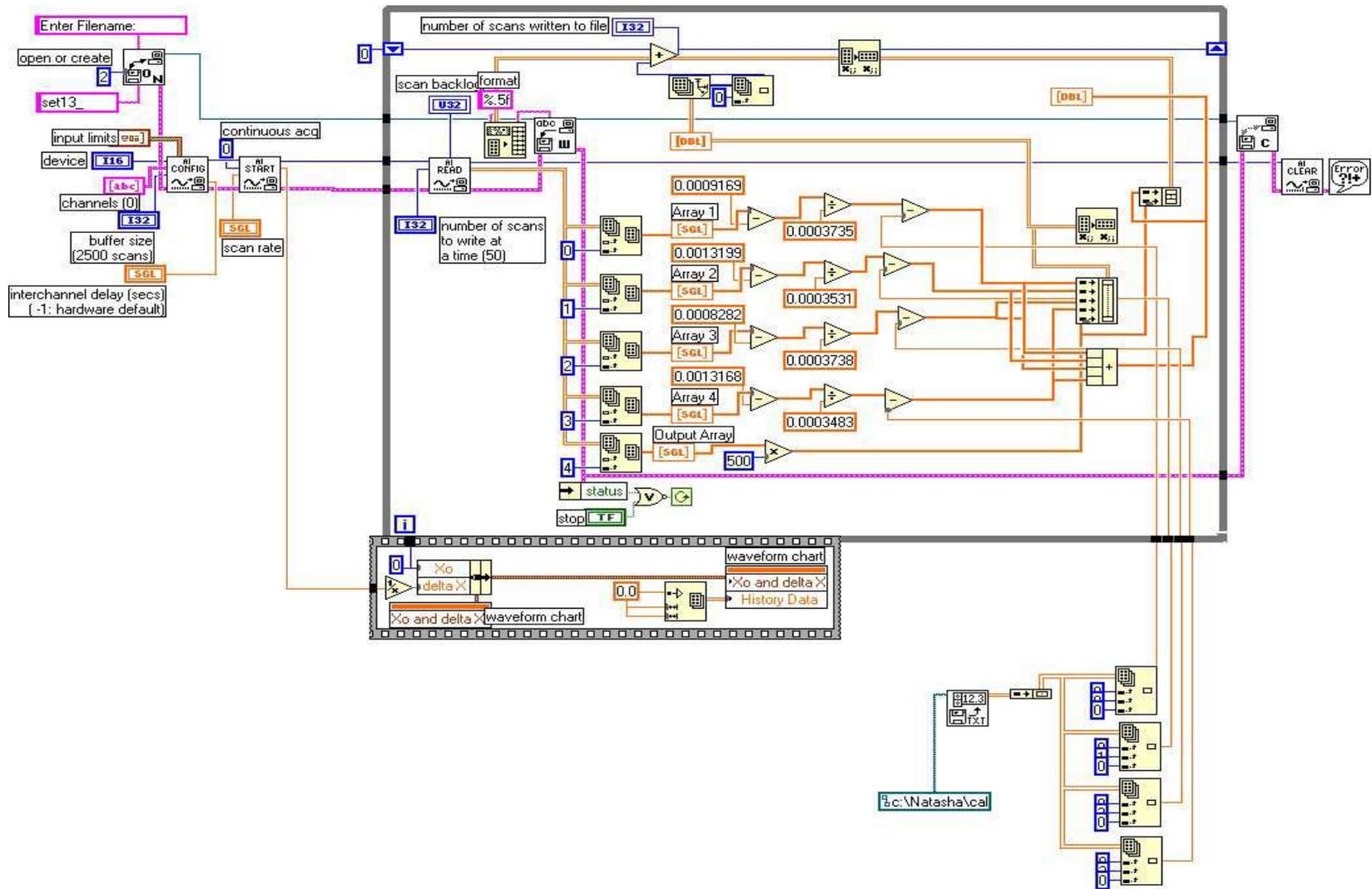


*ANEXO 2 - Programa para aquisição de dados das quatro células de carga e do sensor magnético*

*Painel Frontal*

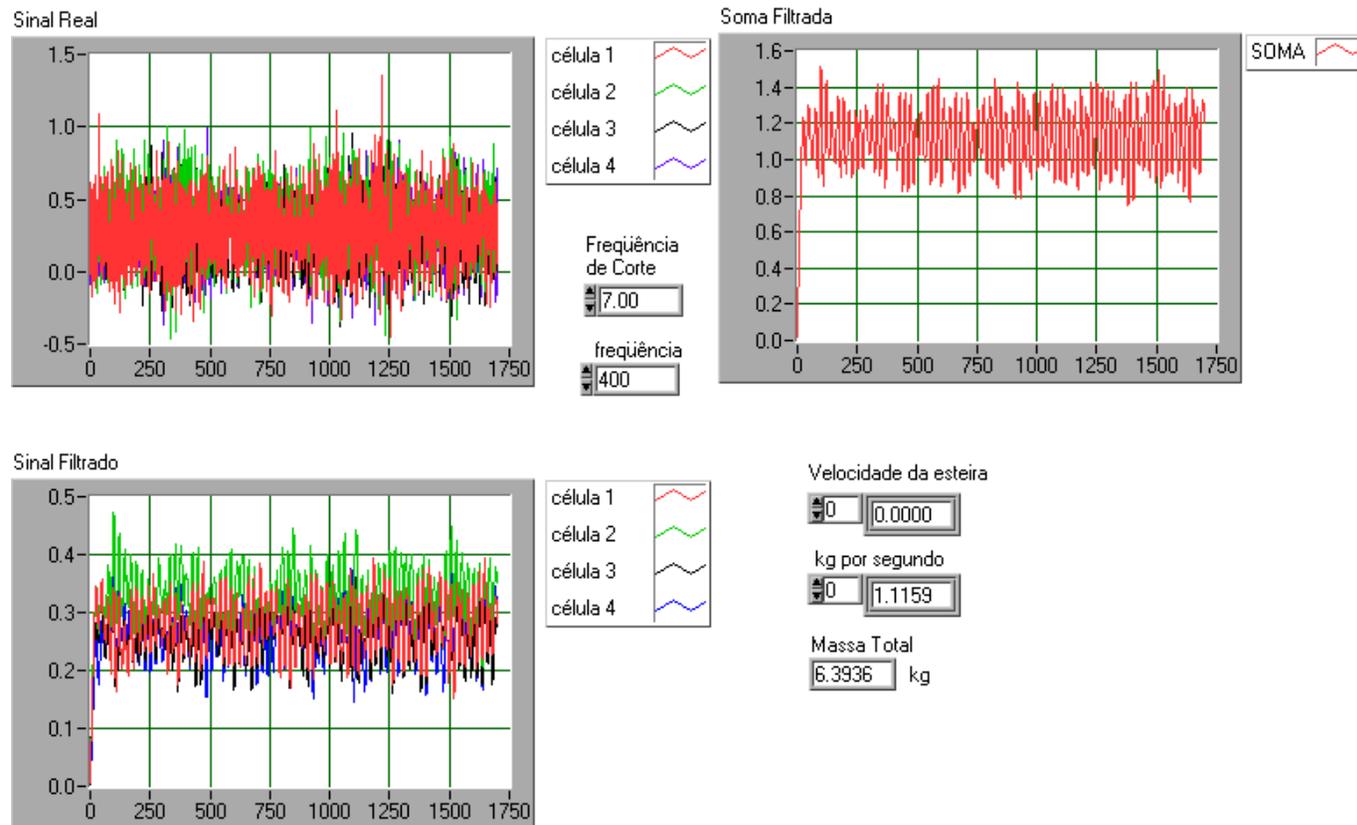


# Diagrama de Bloco

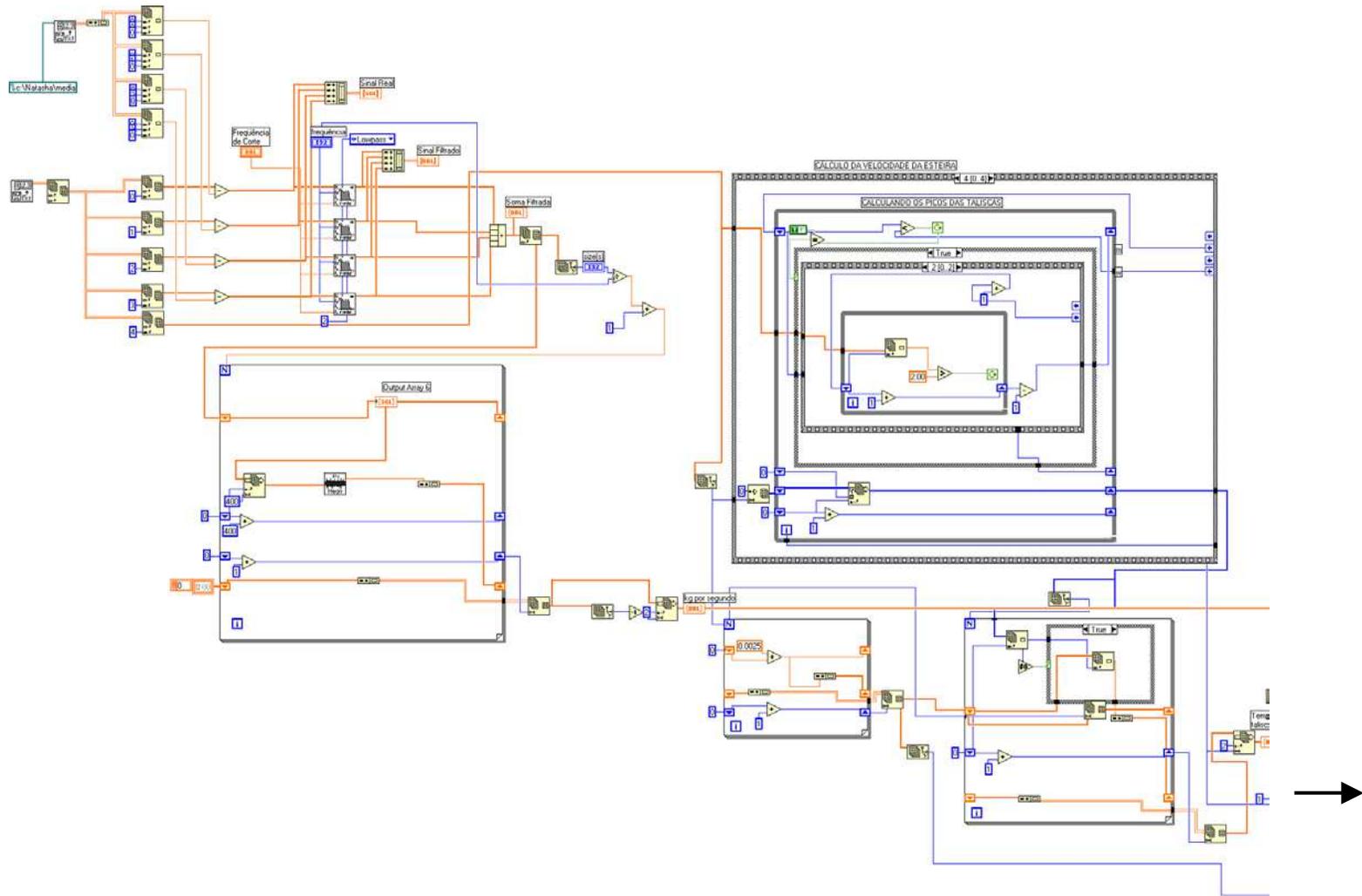


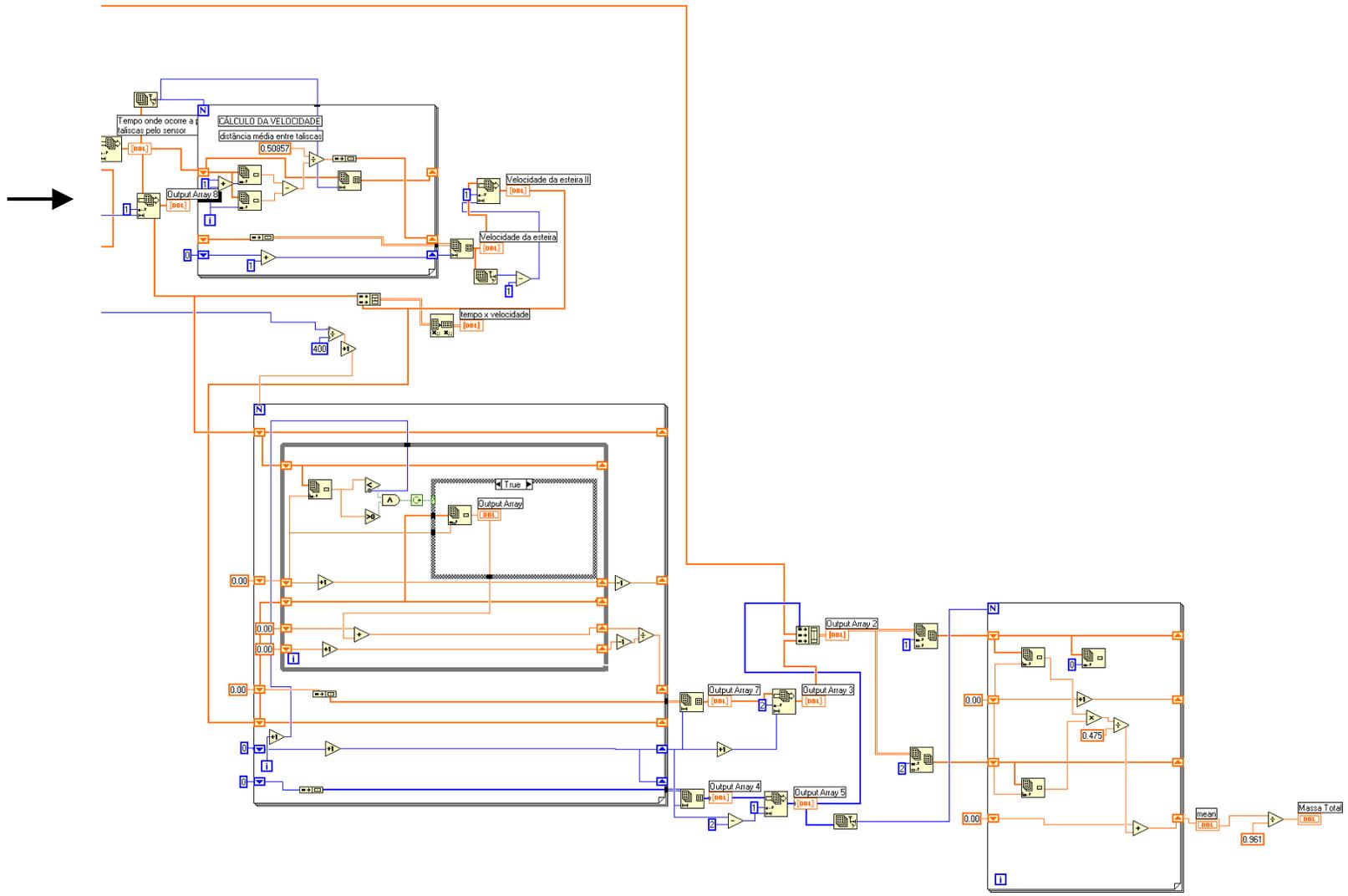
## ANEXO 3 – Programa para a análise dos dados.

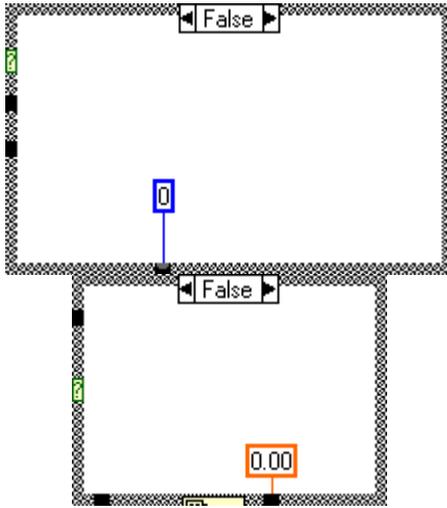
### Painel Frontal



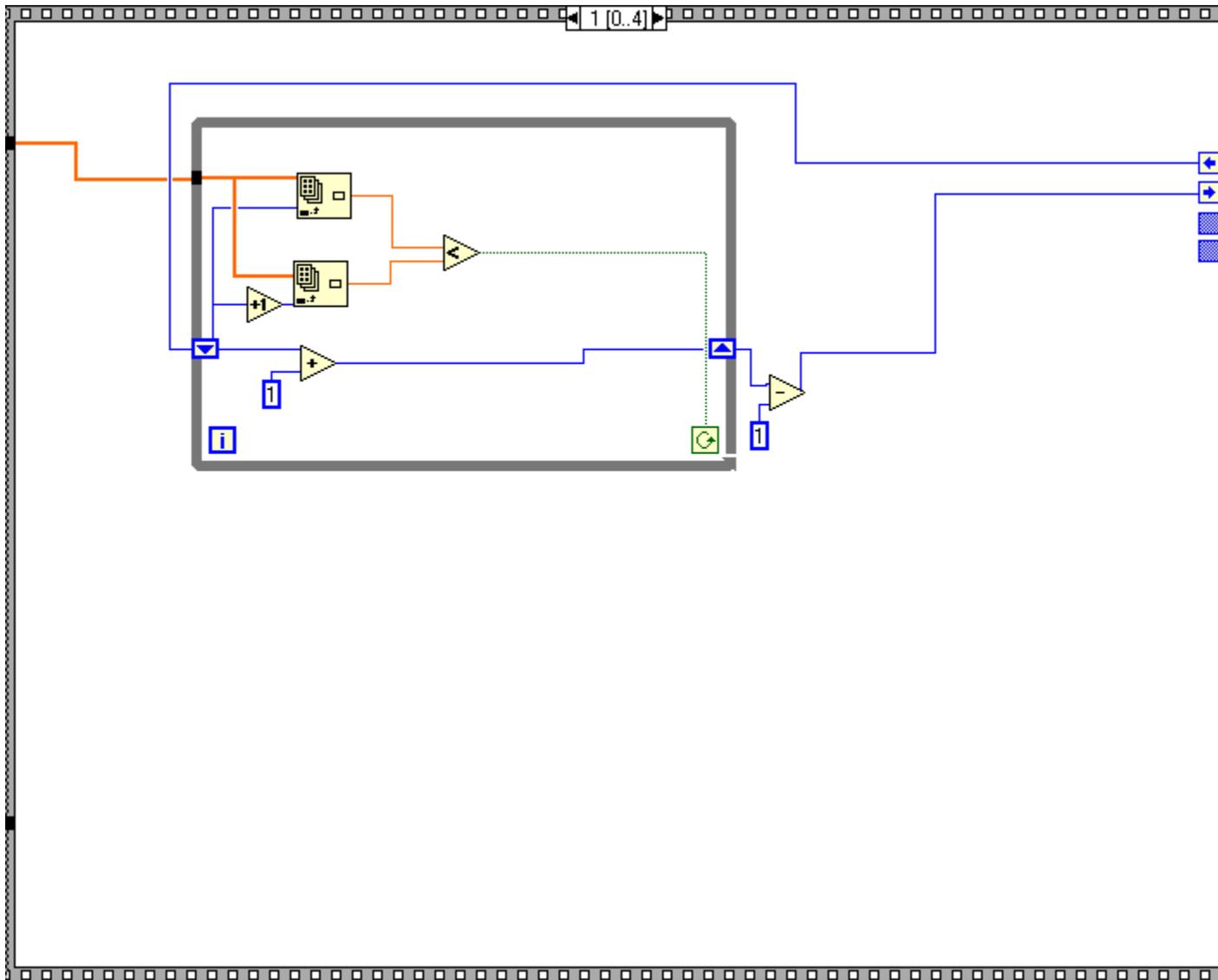
# Diagrama de Bloco











CALCULANDO O ÚLTIMO PICO DA TALISCA

