**Universidade de São Paulo
Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”**

Desenvolvimento de um aspersor de taxa variada para irrigação de precisão

Robson André Armindo

**Tese apresentada para obtenção do título de Doutor em
Agronomia. Área de concentração: Irrigação e Drenagem**

**Piracicaba
2009**

Robson André Armino
Engenheiro Agrícola

Desenvolvimento de um aspersor de taxa variada para irrigação de precisão

Orientador:
Prof. Dr. **TARLEI ARRIEL BOTREL**

**Tese apresentada para obtenção do título de Doutor em
Agronomia. Área de concentração: Irrigação e Drenagem**

**Piracicaba
2009**

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
DIVISÃO DE BIBLIOTECA E DOCUMENTAÇÃO - ESALQ/USP**

Armindo, Robson André

Desenvolvimento de um aspersor de taxa variada para irrigação de precisão / Robson
André Armindo. - - Piracicaba, 2009.
98 p. : il.

Tese (Doutorado) - - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", 2009.
Bibliografia.

1. Aspersores - Automação 2. Irrigação de precisão 3. Irrigação por pivô central
4. Tecnologia agrícola I. Título

CDD 631.7
A729d

"Permitida a cópia total ou parcial deste documento, desde que citada a fonte – O autor"

Aos meus pais João Armindo Neto e Maria do Carmo Maculan

Aos meus irmãos Ronan Marcos Armindo e Rose Marie Armindo

por sempre me proporcionarem incentivo, força, apoio e amor.

(DEDICO)

A minha amada noiva Aliandra por todo apoio, segurança, carinho e companheirismo durante todas as dificuldades e alegrias. A você meu amor meu muito obrigado...

(OFEREÇO)

AGRADECIMENTOS

A Deus por me conceder força, saúde e disposição para a realização deste trabalho.

A Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” (ESALQ/USP) pela oportunidade de realização do curso de doutoramento e ao ensino público brasileiro.

Ao orientador e amigo professor Tarlei Arriel Botrel pela orientação e sábios conselhos que me proporcionaram muitos momentos de reflexão, aprendizado e crescimento.

A Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) pela bolsa concedida durante o desenvolvimento do projeto.

Aos professores e funcionários do Departamento de Engenharia Rural da ESALQ/USP pelo conhecimento, apoio e atenção e em especial ao “seu” Antônio, Áureo, Chicão, Davilmar, Gilmar, “seu” Hélio, Luís, Osvaldo e Vanda.

Aos integrantes do Grupo de Práticas em Irrigação e Drenagem (GPID) pelo auxílio durante todo o tempo de pós-graduação realizado.

Aos “mestres” do ensino que convivi desde minha alfabetização até o presente momento.

Ao sempre orientador e amigo professor Joaquim Paulo da Silva por ter me proporcionado a primeira oportunidade em iniciação científica acreditando em meu potencial.

As queridas Cristina, Letícia e Isabelle.

Aos amigos de sala Antônio, Ceres, Dinara, Marinaldo e Wanderley pela constante troca de experiências e aprendizados e, especialmente ao amigo Tiago Capello Garzella pelas valiosas contribuições durante todo o período de pós-graduação.

Aos amigos da pós-graduação: Adalberto, Allan, Clarette, Basalto, Carlos, Cícero, Cláudio, Cleomar, Cornélio, Dalva, Dani, Danilton, Fabiana, Garotinho, Janaína, João Batista, João Lélis, Kelly, Ligia, Lucas Faria, Lucas Vellame, Marco Rosa, Marconi, Pabblo, Pedro Róbinson, Pedro Giongo, Ronaldo, Sérgio, Ticão e Valfísio pela convivência e aprendizado.

Aos amigos: Antônio Bianchi, Inael, Joel Felipe, Juliana Souza, Leandro, Leônidas, Marllon Chalfun, Natiele de Medeiros, Patrícia Ferreira, Patrick Schmidt e Vanderson que me apoiaram durante este curso de doutorado.

Ao casal Márcio e Carolzinha pela convivência, amizade e bons momentos de alegria vividos. Ao casal Valdir e Fiva pelo carinho e acolhimento nesta cidade.

Por fim, a todos que contribuíram de alguma forma para realização deste trabalho.

*"Você não sabe o quanto eu caminhei
Prá chegar até aqui
Percorri milhas e milhas antes de dormir
Eu nem cochilei
Os mais belos montes escalei
Nas noites escuras de frio chorei*

*A vida ensina e o tempo traz o tom
Prá nascer uma canção
E com a fé do dia-a-dia encontro a solução*

*Meu caminho só meu Pai pode mudar
Meu caminho só meu Pai
Meu caminho só meu Deus..."*

De: Toni Garrido / Lazão / Da Gama / Bino

SUMÁRIO

RESUMO	11
ABSTRACT	13
LISTA DE FIGURAS	15
LISTA DE TABELAS	19
LISTA DE SÍMBOLOS	21
1 INTRODUÇÃO.....	23
2 DESENVOLVIMENTO.....	25
2.1 Justificativa e Relevância	25
2.2 Importância e utilização da água no contexto da irrigação de precisão e da variabilidade espacial e temporal das propriedades dos solos.....	26
2.3 Viabilidade Agronômica e Econômica.....	29
2.4 Sensoriamento	30
2.4.1 Sensoriamento Direto	30
2.4.2 Sensoriamento Remoto.....	32
2.5 Sistemas de aplicação em taxa variada.....	35
2.6 Considerações de projeto.....	37
2.7 Técnicas para variação de vazão em aspersores	39
2.7.1 Controle da velocidade de deslocamento do equipamento de irrigação.....	39
2.7.2 Controle da vazão dos aspersores ao longo da linha lateral	40
2.8 Sistemas de aplicação em taxa variada.....	41
2.8.1 Controle da área do bocal do aspersor.....	43
2.8.2 Controle da frequência de pulsos	43
2.8.3 Controle da injeção de ar no sistema	44
2.9 Sistemas de posicionamento.....	45
2.10 Motores de passo	46
2.10.1 Características dos motores de passo	47
2.10.2 Tipos de motores de passo.....	48
2.11 Porta paralela	49
2.12 Análise do erro aleatório e erro sistemático	51

2.13 Material e métodos	52
2.13.1 Localização e Etapas do Experimento	52
2.13.2 Referencial Ideológico	53
2.13.3 Calibração	55
2.13.4 Ensaios de campo	59
2.13.5 Automação do protótipo desenvolvido	62
2.14 Resultados e Discussão	64
2.14.1 Calibração	64
2.14.1.1 Avaliação para rotação anti-horária da haste	64
2.14.1.2 Avaliação para rotação horária da haste	69
2.14.1.3 Modelos para predição de vazão nos aspersores de taxa variada	74
2.14.1.4 Coeficiente de descarga	75
2.14.2 Ensaios de campo	79
2.14.3 Automação do protótipo desenvolvido	85
2.14.4 Quimigação	86
3 CONCLUSÃO	89
REFERÊNCIAS	91

RESUMO

Desenvolvimento de um aspersor de taxa variada para irrigação de precisão

Devido à limitação dos recursos hídricos que está cada vez mais perto do limite, a utilização da água na agricultura precisa ser mais eficiente visando à manutenção dos níveis atuais de produtividade aliada a expansão da área irrigada. A eficiência dos sistemas de irrigação quanto ao uso da água pode ser aumentada adequando-se a quantidade aplicada de água às condições específicas do solo e da cultura, as quais variam dentro da lavoura. É notória a necessidade de equipamentos que sejam capazes de aplicar variadas lâminas de irrigação a fim de sanar a necessidade hídrica do solo levando-se em conta a variabilidade espacial e temporal. Assim, neste trabalho, teve-se por objetivo desenvolver e avaliar um aspersor de taxa variada para a utilização em pivôs-centrais e/ou sistemas lineares de irrigação com potencialidade de utilização em projetos de irrigação de precisão. Dois protótipos foram desenvolvidos realizando-se em laboratório suas referidas calibrações bem como o ajuste de seus coeficientes de descarga. Realizou-se com êxito uma modelagem para se estabelecer uma equação para predição de vazão em aspersores de taxa variada. A calibração do protótipo do aspersor de taxa variada I apresentou resultados estatísticos satisfatórios, entretanto resultados técnicos questionáveis. Já o processo de calibração do protótipo do aspersor de taxa variada II apresentou resultados estatísticos e técnicos satisfatórios, sendo o protótipo escolhido para realização de ensaios de campo e posteriormente sua automação. Em ensaios de campo, determinaram-se perfis radiais de distribuição para o segundo protótipo, seguindo as recomendações da norma técnica da *ASABE*, encontrando-se os alcances correspondentes as diversas vazões ensaiadas e com os dois defletores rotativos de quatro e seis jatos testados em campo. A automação desse protótipo foi realizada por meio do acionamento de um motor de passo utilizando-se a comunicação de porta paralela de um microcomputador controlada por um *software* desenvolvido em linguagem pascal em ambiente Delphi. Os resultados foram considerados satisfatórios proporcionando a viabilidade técnica da idéia de construção de um aspersor de taxa variada a ser utilizado em projetos de irrigação de precisão.

Palavras-Chave: Aspersor de taxa variada; Irrigação de precisão; Pivô central; Sistema linear de irrigação; Automação

ABSTRACT

Flow rate sprinkler development for the site specific irrigation

Due to depletion of hydric resources which are nearing limits, water use in agriculture requires more efficient to maintain current levels of yield in the expansion of irrigated areas. The efficiency of irrigation systems as for water use can be increased adjusting the amount of water applied to the specific conditions of soil and crop, which vary in the field. It is evident the need for equipment capable of applying different irrigation levels in order to supply the water requirement of the soil taking into account the spatial and temporal variability. So, this work aims to develop and evaluate a flow rate sprinkler to be used in center pivots or linear moving irrigation systems with the potential for utilization in scheduling irrigation. Two prototypes were developed. Their calibrations and discharge coefficient adjustments were carried out in a laboratory. To predict flow rate, it was established a successful model that represents flow rate sprinklers operation. The calibration of the flow rate sprinkler prototype I showed good statistical results, however questionable technical results. As for the calibration process of flow rate sprinkler prototype II showed satisfactory statistical and technical results. This prototype was chosen to be implemented in field-testing and to be automated. In field tests, it was determined radial distribution profiles for the second prototype, following recommendations of ASABE technical standard. Sprinkler radius of throw was determined by different flow rates tested and two types of rotating deflectors: four and six jets. The automation of the prototype was obtained through driving a step motor using the communication of parallel port of a microcomputer which was controlled by a software program developed for this purpose. Results were considered satisfactory and provided technical feasibility to build a flow rate sprinkler to be used in precision irrigation.

Keywords: Flow rate sprinkler; Precision irrigation; Center pivot; Irrigation moving linear system; Automation

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Sensor de umidade e temperatura do solo desenvolvido por Vellidis et al. (2007).....	31
Figura 2 - Sensor MEMS de umidade e temperatura do solo desenvolvido por Jackson et al. (2007).....	32
Figura 3 - a) Lâminas de irrigação e dosagens de nitrogênio em taxa variada. b) Parcelas de temperaturas do dossel ao longo da área.....	33
Figura 4 - Áreas de stress biótico e abiótico em uma área de algodão irrigado	34
Figura 5 - Mapa de temperatura do dossel monitorada por sensores de infravermelho	35
Figura 6 - Imagem da técnica utilizada por pesquisadores da USDA-ARS	40
Figura 7 - Imagem da técnica utilizada por pesquisadores da Universidade de Idaho.....	41
Figura 8 - Imagem do Farmscan Canlink 3000. a) compressor de ar. b) esquema completo do sistema	42
Figura 9 - Imagem do aspersor de taxa variada desenvolvido por King e Kincaid (2004)	43
Figura 10 - Imagem da técnica utilizada por Camp et al. (1996) e Omary et al. (1996).....	45
Figura 11 - Imagem das partes que constituem o motor de passo. a) rotor b) estator	47
Figura 12 - Imagem dos conectores DB25 para porta paralela. a) conector macho b) conector fêmea	49
Figura 13 - Imagem do esquema de ligação dos pinos do conector DB25	50
Figura 14 - Imagem do protótipo ATV ₁ . a) Detalhamento do conector tipo “Y”, luva, mancais guias, niple e bocal. b) construção da haste e montagem do ATV ₁	53
Figura 15 - Imagem do protótipo construído. a) Vista frontal. b) detalhe em perspectiva.....	54
Figura 16 - a) Imagem do protótipo do aspersor de taxa variada II. b) Imagem da haste de ponta cônica de acrílico e bocal de acrílico	55
Figura 17 - Imagem da haste de ponta cônica para promover a variação da área do bocal	55
Figura 18 - Projeção da área do bocal alterada pelo movimento vertical da haste.....	56
Figura 19 - Imagem do circuito hidráulico montado para realização da calibração do ATV ₁	59
Figura 20 - Distribuição das linhas de coletores a serem utilizadas na realização dos ensaios....	60
Figura 21 - Imagem dos refletores rotativos utilizados nos ensaios de campo. a) defletor de quatro jatos. b) defletor de seis jatos.....	61

Figura 22 - Imagem do acoplamento do motor de passo a polia de acionamento da haste do protótipo desenvolvido	62
Figura 23 - Fluxograma de comando para o acionamento do protótipo desenvolvido. LBI - lâmina bruta de irrigação. RAP - Requerimento de água no ponto. IPAH - Identificação da posição atual da haste. q - vazão	63
Figura 24 - Comportamento da vazão em função da rotação anti-horária imposta a haste e das pressões estabelecidas nos ensaios de calibração. a) ATV_1 b) ATV_2	64
Figura 25 - Superfícies de resposta para o ATV_1 operado em rotação anti-horária da haste. a) representação dos dados observados em ensaios. b) ajuste para predição de valores pelo modelo teórico	65
Figura 26 - Superfícies de resposta para o ATV_2 operado em rotação anti-horária da haste. a) representação dos dados observados em ensaios. b) ajuste para predição de valores pelo modelo teórico	66
Figura 27 - Retas de comparação 1:1 entre valores observados e valores estimados pelo modelo teórico em condição de rotação anti-horária da haste. a) ATV_1 . b) ATV_2	67
Figura 28 - Representação gráfica dos dados observados, simulados e erro para a condição de rotação anti-horária. a) ATV_1 para a pressão máxima de operação de 280 kPa. b) ATV_2 para a pressão máxima de operação de 250 kPa	68
Figura 29 - Comportamento da vazão em função da rotação horária imposta a haste e das pressões estabelecidas nos ensaios de calibração. a) ATV_1 b) ATV_2	69
Figura 30- Superfícies de resposta para o ATV_1 operado em rotação horária da haste. a) pelo modelo teórico representação dos dados observados em ensaios. b) ajuste para predição de valores.....	70
Figura 31 - Superfícies de resposta para o ATV_2 operado em rotação horária da haste. a) representação dos dados observados em ensaios. b) ajuste para predição de valores pelo modelo teórico.....	71
Figura 32 - Representação gráfica dos dados observados, simulados e erro para a condição de rotação horária. a) ATV_1 para a pressão máxima de operação de 280 kPa. b) ATV_2 para a pressão máxima de operação de 250 kPa.....	72
Figura 33 - Retas de comparação 1:1 entre valores observados e valores simulados pelo modelo teórico em condição de rotação horária da haste. a) ATV_1 . b) ATV_2	73

Figura 34 - Comportamento do coeficiente de descarga função da rotação imposta à haste. a) ATV_1 b) ATV_2	75
Figura 35 - Validação do modelo teórico proposto pela eq. (8) em pressões pré-estabelecidas para o ATV_1	78
Figura 36 - Validação do modelo proposto teórico pela eq. (8) em pressões pré-estabelecidas para o ATV_2	79
Figura 37 - Perfis médios de distribuição do ATV_2 operado em diferentes pressões e vazões e com dois tipos de defletores rotativos	81
Figura 38 - Perfis de distribuição do ATV_2 operado em mesma pressão obtendo vazões diferentes em função do movimento da haste	84
Figura 39 - Comparação entre os dados observados de vazão em rotação horária e anti-horária da haste do protótipo ATV_2	85
Figura 40 - Imagens do acoplamento final do motor de passo ao ATV_2	86
Figura 41 - ATV_2 operado em condições de formação de spray com gotas mais finas. a) defletor fixo utilizado. b) imagem do aspecto visual do spray de gotas finas	87

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Funções dos pinos existentes na porta paralela de conector DB-25.....	51
Tabela 2 - Valores de vazão ($\text{m}^3 \text{ h}^{-1}$) a serem ensaiados em campo para obtenção dos perfis radiais de distribuição do ATV_2 em função de pressão e ângulo de rotação da haste.61	
Tabela 3 - Índices de desvio máximo e erro relativo para os modelos teórico e empírico na predição de vazão de aspersores de taxa variada.....	74
Tabela 4 - Alcance máximo determinado a partir do perfil médio de distribuição referente às condições de operação do ATV_2	82
Tabela 5 - Valores de alcance obtidos para vazões sob mesma pressão para o defletor de seis jatos.....	85

LISTA DE SÍMBOLOS

φ - Ângulo de rotação imposto à haste presente aos protótipos desenvolvidos.

β - Ângulo de ataque na ponta cônica da haste presente aos protótipos desenvolvidos.

α - Metade do ângulo de ataque na ponta cônica da haste presente aos protótipos desenvolvidos.

ρ_s - Massa específica aparente do solo.

Θ - Umidade do solo com base em volume.

Θ_{cc} - Umidade do solo com base em volume na capacidade de campo.

Θ_{pmp} - Umidade do solo com base em volume no ponto de murcha permanente.

Ω - Unidade que representa resistência elétrica, ohm.

1 INTRODUÇÃO

A Agricultura de Precisão consiste de um ciclo de análise da produtividade da cultura. Nesse ciclo está inserido o mapeamento da variabilidade da colheita; a identificação das características do solo e planta via coleta de amostras ou imagens de satélite; a realização de um mapa de correção; o tratamento dos fatores que provocam a variabilidade espacial da produtividade controlando precisamente a aplicação de insumos de acordo com a necessidade local permitindo assim um gerenciamento mais adequado. Comprovadamente no campo científico e prático encontram-se na agricultura de precisão muitas vantagens, como: (a) economia de insumos agrícolas (agrotóxicos, fertilizantes, corretivos agrícolas); (b) aumento da produtividade, devido à otimização dos recursos do solo e (c) sustentabilidade da terra em longo prazo explorando-a de forma otimizada e não depredadora.

Utilizando-se o mesmo princípio, pode-se obter também uma utilização mais racional da água. Projetos de irrigação ainda são elaborados partindo-se do pré-suposto de que a área seja totalmente uniforme resultando em uma lâmina de irrigação constante em toda área. Estudos têm sido realizados a fim de se aplicar água em taxa variada levando-se em conta a variabilidade espacial do solo e variabilidade genética das plantas tendo assim por objetivo não só a busca por maior produtividade e receita líquida, mas, sobretudo pela otimização do uso da água.

Alguns autores como Fraisse et al. (1992); Duke et al. (1992); Fraisse, Heermann e Duke (1995); King e Kincaid (2004) na maioria, dispostos em países como Estados Unidos e Austrália, elaboraram e apresentaram diversas soluções para que os equipamentos pudessem realizar a aplicação de água valendo-se da correção espacial. Equipamentos como pivô central e sistema linear de irrigação foram os mais adaptados nesses projetos. Alguns poucos trabalhos relatam projetos de aspersão convencional e irrigação localizada, que por sua vez, clama por projetos que garantam maior correção na aplicação de água levando-se em conta a variabilidade existente entre as unidades e, até mesmo, subunidades de irrigação.

Seria ideal, após a constatação de que a área a ser irrigada não seja homogênea quanto às características de solo e planta, lançar mão do uso de equipamentos de irrigação dispostos de uma tecnologia mais avançada. Os sistemas de irrigação que operam realizando aplicação de água em taxa variada são necessários para se realizar um manejo de água diferenciado na área. Tal necessidade pode ser suprida com o projeto de aspersores com aplicação de água em taxa variada.

Dessa forma, tem-se por objetivo, neste trabalho, desenvolver um aspersor de taxa variada avaliando-se tecnicamente suas características hidráulicas, um modelo teórico para predição de vazão e o comportamento de seu perfil radial de distribuição de água.

2 DESENVOLVIMENTO

2.1 Justificativa e Relevância

Desde o início da década de noventa é crescente o enfoque sobre a necessidade de maior cuidado com a preservação dos recursos naturais do planeta, visando reduzir a degradação ambiental (FRAISSE et al., 1995). Com o intuito de se gerenciar de forma mais adequada o sistema agrícola, o interesse nos tratamentos localizados da lavoura retrata a provável opção mais viável para a manutenção dos níveis de produtividades atuais com redução na utilização de insumos (KING e KINCAID, 2004).

Ainda na década de noventa, alguns trabalhos relatam a utilização de receptores de sinais de Sistemas de Satélites de Navegação Global (GNSS) em colhedoras e outras máquinas agrícolas, permitindo o monitoramento da variabilidade espacial das lavouras e o tratamento localizado com base na variabilidade observada (AL-KUFAISHI et al., 2006). Ajustando-se a aplicação de fertilizantes na safra seguinte, produtividades mais uniformes seriam obtidas (DEBOER et al., 1992).

A percepção de que a uniformidade da produtividade dependia de vários outros fatores de produção, desencadeou uma série de estudos visando permitir um controle mais apurado desses fatores (OMARY et al., 1997). Como a água despontava-se como fator de maior relação com a variabilidade da produtividade, somando-se às recentes preocupações com a degradação ambiental, formas de se gerenciar esse insumo de modo mais eficiente passaram a ser alvo de forte estudo (DUKE et al., 1992).

Os sistemas de irrigação eram e ainda são projetados com o objetivo de se garantir uma lâmina uniforme de aplicação ao longo de todo comprimento da tubulação e durante todo o percurso do sistema (FRAISSE et al., 1995 e OMARY et al., 1997). Entretanto, a nova tendência sugeria a possibilidade de se projetar sistemas capazes de variar a lâmina de aplicação tanto ao longo do comprimento da tubulação quanto no sentido de deslocamento do sistema (DUKE et al., 1992).

Nesse sentido, os sistemas lineares de irrigação por aspersão e os sistemas de irrigação por pivô central caracterizavam-se como plataformas ideais para o desenvolvimento de tecnologias associadas à aplicação localizada de água (KING e KINCAID, 2004). Por ser uma

recente área de estudo, os sistemas de irrigação em taxa variada devem se tornar mais eficientes quanto à operacionalidade e à utilização de água e energia (DUKES e PERRY, 2006). Sadler et al. (2005) acreditam que sistemas de irrigação auto-propelidos terão uma significativa importância no futuro da irrigação de precisão.

Por ser um recurso natural de importância fundamental, práticas que proporcionem um uso mais eficiente da água são de extrema importância. Na irrigação de precisão tem-se por objetivo otimizar o processo de produção agrícola por meio da aplicação da quantidade correta de água no momento e no local adequado, considerando a variabilidade espacial e temporal dos fatores de produção. Argumentos baseados na conservação ambiental justificam o desenvolvimento de equipamentos de irrigação capazes de aplicar lâminas variadas de água em porções diferentes da lavoura. Entretanto, os benefícios econômicos e agrônômicos da aplicação de água em taxa variada necessitam de mais estudos.

2.2 Importância e utilização da água no contexto da irrigação de precisão e da variabilidade espacial e temporal das propriedades dos solos

A água é um dos fatores de produção mais importante para a agricultura, que por sua vez, segundo Rijsberman (2006), é a uma das atividades que mais consome água. A irrigação, em regiões úmidas, é explorada com caráter suplementar, vindo a diminuir os riscos inerentes à produção e proporcionar níveis ótimos de produtividades. Já em regiões secas, a irrigação torna-se prática obrigatória para que a produção agrícola atinja resultados econômicos satisfatórios (AL-KUFAISHI et al., 2006).

Diversos autores discorrem sobre os desafios da utilização da água pela agricultura. Sadler et al. (2005), afirmam que a iminente escassez dos recursos hídricos sugere uma utilização cada vez mais eficiente da água nos sistemas agrícolas. A necessidade de conservação dos recursos hídricos exige uma conscientização dos agricultores no sentido de otimizarem a utilização da água, a fim de se permitir a sustentabilidade do ambiente e consequentemente do sistema produtivo (RIJSBERMAN, 2005). Dukes e Perry (2006) citam que com a disponibilidade hídrica tornando-se limitante e com o consumo humano possuindo exploração prioritária desse recurso, esforços no sentido de se adequar a quantidade de água aplicada a real necessidade dos sistemas produtivos são fundamentais.

Ottman e Pope (2002) afirmam que a irrigação em excesso pode além de contribuir com a escassez desse recurso, ocasionar a contaminação de corpos d'água pela lixiviação e carregamento de nutrientes e partículas. Em contrapartida, quantidades insuficientes de água podem causar estresse hídrico e baixa produtividade das culturas (AL-KUFAISHI et al., 2006).

Outro grande desafio da irrigação trata-se da variabilidade espacial de atributos físicos e químicos do solo e da variabilidade espacial e temporal da condição da cultura, fazendo com que a mesma quantidade de água aplicada em porções diferentes da lavoura possa proporcionar efeitos bem diferentes (STONE et al., 2006). Alguns trabalhos como o de Israelsen e Hansen (1965) cita que para solos de textura arenosa e argilosa a umidade na capacidade de campo (Θ_{cc}) possui valores médios de 9 e 35% e a massa específica aparente (ρ_s) valores médios de 1,65 e 1,25 g cm⁻³ respectivamente; para a umidade no ponto de murcha permanente (Θ_{pmp}), esses solos apresentam valores médios de 4 e 17% respectivamente.

Solos distintos possuem diferentes capacidades de retenção de água e diferentes condutividades hidráulicas. Isso leva à exigência de diferentes quantidades de água visando alcançar a capacidade de campo e minimizar o escoamento superficial. A quantidade de nutrientes adsorvida também é desuniforme de acordo com o tipo de solo. Essas características incentivam o desenvolvimento de tecnologias que permitam a aplicação localizada de insumos (OMARY et al., 1997).

Camp e Sadler (2002) mencionam que a combinação de solos altamente variáveis com outros fatores de produção, também variáveis, proporciona uma complexa condição de gerenciamento visando otimizar a produção e o uso da água.

A água foi o primeiro insumo a ser gerenciado dentro de um sistema produtivo, com registros arqueológicos de mais de oito mil anos desse gerenciamento, na região do rio Nilo, na Mesopotâmia, e perto de outros rios na China, Índia e América. Esse fato evidencia uma longa história de pesquisa em irrigação, e quase obriga a obtenção de novos métodos de aplicação de água e gerenciamento desses métodos (SADLER et al., 2002).

Recentemente um significativo enfoque tem sido dado às práticas relacionadas à agricultura de precisão, principalmente pelo potencial elevado dessas otimizar o processo de produção agrícola. Um dos conceitos básicos da agricultura de precisão é aplicar a quantidade correta de insumos no momento e local adequados. Vanden Heuvel apud Heermann et al. (2002) afirma que a agricultura de precisão não se resume à utilização de equipamentos de alta

tecnologia, porém relaciona-se à aquisição e ao uso com sabedoria da informação obtida pela tecnologia.

Em sua essência, a agricultura de precisão permite o gerenciamento do sistema produtivo considerando-o como desuniforme. Essa técnica vem a estudar os fatores causadores de variabilidade e atuando de forma a obter um melhor rendimento econômico da atividade (AL-KUFAISHI et al., 2006).

Em um trabalho apresentado por Heermann et al. (2002), no qual se estudou os principais atributos causadores de variabilidade num sistema irrigado de produção agrícola, verifica-se que a variabilidade observada na produtividade pode ser explicada principalmente pela condição de umidade do solo na área. Durante observações espacializadas do desenvolvimento de culturas no sul de Coastal Plain, Karlen et al. (1990) notou-se que fatores relacionados à disponibilidade hídrica, principalmente em períodos secos, são os principais causadores da variabilidade obtida na produtividade.

É dentro dessa linha de estudo que, desde a década de noventa, a irrigação de precisão vem sendo desenvolvida, em resposta à necessidade de se fornecer água ao solo de acordo com a variabilidade espacial da topografia, do tipo de solo, da disponibilidade de água do solo, do sistema de produção e de outros fatores, visando tanto a otimização da produção como a conservação dos recursos hídricos e do ambiente (STONE et al., 2006).

O termo irrigação de precisão, para o setor de irrigação, comumente conota à aplicação no momento certo da quantidade adequada de água, mas considerando elevada uniformidade ao longo de toda lavoura. No contexto da agricultura de precisão, a irrigação de precisão passa a agregar a adequação à variabilidade espacial do sistema produtivo (SADLER et al., 2005). Assim, a irrigação de precisão pode ser definida como a aplicação de água em quantidade precisa e no momento certo, de acordo com a variabilidade espacial e temporal do solo e em resposta à demanda da cultura durante os diferentes estágios de desenvolvimento (AL-KUFAISHI et al., 2006).

2.3 Viabilidade Agronômica e Econômica

Uma questão de grande importância dentro da irrigação de precisão é sobre a viabilidade da aplicação localizada de água, considerando os aspectos agronômicos e econômicos dessa atividade.

Se a disponibilidade de água é um dos principais fatores condicionantes da variabilidade da produtividade (HEERMANN et al., 2002 e SADLER et al., 2002), a aplicação de água em taxa variada traz algumas incógnitas quanto ao favorecimento da homogeneização da produtividade (HEERMANN et al., 2002). É de conhecimento geral que muitos atributos físicos do solo se relacionam com a disponibilidade da água às culturas, e muitos nutrientes também possuem sua eficiência de absorção pelas plantas relacionadas com a água. Assim, identificar quais parâmetros devem ser considerados na determinação da lâmina de irrigação recomendada a cada porção da lavoura não é uma tarefa fácil (SADLER et al., 2005).

Nesse cenário, ganha significativa importância os modelos de simulação de irrigação, capazes de integrar informações de solo, clima, planta e gerenciamento para auxiliar na definição da melhor estratégia de atuação (AL-KUFAISHI et al., 2006).

No trabalho desenvolvido por Al-Kufaishi et al. (2006), avaliou-se a economia de água utilizando-se de um sistema de irrigação com aplicação em taxa variada em relação ao mesmo sistema operando em aplicação uniforme. Os autores observaram que a perda de água foi maior com o sistema operando em condição uniforme, justificando a aplicação em taxa variada, quando se considera somente a conservação dos recursos hídricos. Os mesmos autores afirmam que trabalhos considerando o consumo de energia e o desenvolvimento da cultura em cada condição de funcionamento do sistema ainda precisam ser realizados.

Sadler et al. (2005) afirmam que as justificativas para utilização da irrigação de precisão são extremamente satisfatórias quando considerado a oportunidade de conservação do ambiente e dos recursos hídricos. Sadler et al. (2005) afirmam ainda que grande parte das ferramentas desenvolvidas com o intuito de aumentar a eficiência econômica da atividade agrícola, não considera o nível de conhecimento e a habilidade do operador que será responsável pelo gerenciamento do sistema, e que, portanto, esse não será capaz de proporcionar a eficiência e economia esperada.

O estudo da viabilidade econômica da aplicação de água em taxa variada é uma tarefa de difícil realização, uma vez que poucos equipamentos estão disponíveis comercialmente, os custos de aquisição e operação ainda são pouco conhecidos e a resposta real das culturas a esse tratamento também é de complexa definição (SADLER et al., 2005). Os autores afirmam que somente após estudos avaliando a viabilidade técnica e econômica da utilização de sistemas de irrigação de precisão é que será possível avaliar a resposta das culturas à aplicação de água e nutrientes em taxa variada.

A principal justificativa econômica da agricultura de precisão relaciona-se à economia de insumos para a obtenção de um mesmo nível de produtividade. Com menor investimento em insumos, os produtores tornam-se mais sujeitos aos riscos da atividade, os quais ainda são significativamente menores que os benefícios econômicos (DeBOER e GRIFFIN, 2006). Entretanto, esse mesmo argumento aplicado à irrigação de precisão aparentemente não é válido devido ao baixo custo da água, fazendo com que o custo da operação não se reduza em proporção ao aumento do risco da atividade (SADLER et al., 2005).

No trabalho de Sadler et al. (2005), são apresentadas fortes justificativas ambientais da utilização da irrigação em taxa variada, entretanto os autores sugerem mais estudos objetivando avaliar a viabilidade agronômica e econômica dessa prática.

2.4 Sensoriamento

O sensoriamento direto ou remoto é uma ferramenta de alto potencial de aplicabilidade na irrigação de precisão, tornando-se indispensável na busca da variabilidade espaço-temporal de solo, planta e clima se objetivando a busca pela informação correta de quando e quanto se irrigar.

2.4.1 Sensoriamento Direto

Assume-se aqui que o sensoriamento direto é realizado quando algumas informações como: umidade e temperatura do solo; umidade do ar; velocidade e direção do vento; radiação solar entre outras são obtidas através do contacto de sensores ativos e o meio que se deseja analisar. Vários autores recomendam a utilização desses sensores em defesa de um manejo mais dinâmico. Algumas aplicações de sensoriamento direto são apresentadas a seguir.

Starr (2005) instalou equipamentos que utilizam a técnica de reflectômetria no domínio do tempo (TDR) em 2002 ao longo de uma área irrigada rotacionada de batata e beterraba para estudar a variabilidade espacial e a estabilidade temporal da umidade do solo a fim de se realizar um manejo de irrigação de precisão. A umidade do solo foi mapeada e comparada com textura e a altimetria da área. A estabilidade temporal explicou 47% da variabilidade presente na umidade do solo; e atribuiu-se uma variabilidade adicional de 20% ao erro aleatório de medição. Calibrou-se um modelo para predição da umidade do solo encontrando-se uma raiz quadrada do erro médio (RMSE) de $0,05 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ para os dados estimados em 2003. Yunseop, Evans e Iversen (2008) automatizaram o mesmo instrumento, instalando-os em cinco pontos de uma área experimental de beterraba açucareira e cevada irrigada nas profundidades de 0,3 e 0,6 m. De acordo com os autores, realizou-se essa automação a fim de monitorar a variabilidade espacial da umidade do solo para a realização de um gerenciamento automatizado em tempo real do manejo da irrigação.

Vellidis et al. (2007) desenvolveram e apresentaram no campus Tifton da Universidade da Georgia um sensor inteligente de baixo custo capaz de determinar, em tempo real, a umidade e temperatura do solo (Figura 1). Os dados coletados foram enviados por comunicação via rádio frequência para um sistema de controle, denominado VRI, que por sua vez tornava-se responsável pela tomada de decisão no manejo da irrigação. Os autores explicam que esse sistema estava ligado ao pivô central para gerenciar as aplicações de água em taxa variada em áreas individuais, tanto no sentido perimetral quanto no sentido radial da área. Essas aplicações em taxa variada foram obtidas promovendo-se intermitência dos aspersores e/ou variando a velocidade de deslocamento do pivô central.

Figura 1 - Sensor de umidade e temperatura do solo desenvolvido por Vellidis et al. (2007)

Jackson et al. (2008) desenvolveram um sensor de umidade e temperatura do solo (Figura 2) baseado na nanotecnologia de um sistema microeletro-mecânico (MEMS). Esse sensor possui um tamanho reduzido, 2 x 2 mm, capaz de simular o efeito de uma partícula de areia contraindo-se na ausência de água e expandindo-se em sua presença. A deformação desse sensor, proveniente de sua expansão e/ou contração, é medida por meio de *strain gauges* em um circuito de ponte de Wheatstone. A concentração de vapor de água atuante sobre esse sensor é traduzida proporcionalmente em um valor de tensão que é armazenado e enviado por um sistema de comunicação *wireless*. O sensor MEMS desenvolvido possui capacidade de memória de 2 MB e opera com 16 bits; possui uma frequência de transmissão e taxa de armazenamento de dados de 2400 e 2048 Hz, respectivamente.

Figura 2 - Sensor MEMS de umidade e temperatura do solo desenvolvido por Jackson et al. (2007)

2.4.2 Sensoriamento Remoto

De acordo com Molin (2001) tem-se sensoriamento remoto quando as informações citadas anteriormente são observadas e coletadas sem o contato físico entre os sensores e o meio que se deseja analisar. A distância que separa o corpo e o sensor pode variar de 1 a 2 m, como em fotocélulas, ou até milhares de quilômetros no caso de satélites. Técnicas de fotogrametria e fotointerpretação associadas ao geoprocessamento, além da utilização de sensores passivos, são utilizadas com intuito de se obter dados de maneira mais rápida e econômica.

Evans et al. (2000) instalaram 26 sensores de temperatura, que operam na faixa de comprimento de onda referente ao infravermelho (IRTs), ao longo de 3 torres de um pivô central

para monitorar a temperatura do dossel da cultura do milho (Figura 3); esses dados foram armazenados em um *data logger* instalado no centro do pivô central. Os autores comentam que a temperatura pode ser utilizada como indicador de stress hídrico da planta, uma vez que essa possui uma correlação com a evapotranspiração, possibilitando a partir de sua medição a realização de um manejo de precisão em uma área irrigada. Valendo-se dos dados coletados os autores criaram 12 unidades diferenciadas de manejo ao longo dessa área justificando o uso desses sensores como indicadores indiretos da umidade do solo.

Figura 3 - a) Lâminas de irrigação e dosagens de nitrogênio em taxa variada. b) Parcelas de temperaturas do dossel ao longo da área

Cohen et al. (2005) apresentaram um estudo realizado em Israel para predição do potencial hídrico da folha de algodão irrigado baseado na análise espacial e em imagens termais. Essas imagens foram obtidas por meio de uma câmera de vídeo infravermelha de atuação na faixa radiométrica. A fim de se gerar uma correlação, calculou-se a temperatura de folhas (CT) especificamente amostradas, por meio de imagens, determinando-se seus valores de potencial hídrico (LPW). Análises estáticas revelaram que a relação entre o índice de stress hídrico da cultura (CWSI) e o LWP apresentou maior estabilidade e uma correlação ligeiramente maior que a relação entre a CT e o LWP. Utilizaram-se os modelos de regressão entre os dados de CWSI e LWP versus os dados de TC e LWP para geração de mapas. Os resultados mostraram que houve variabilidade espacial nas três variáveis testadas e que algumas dessas variações podem ser

atribuídas ao sombreamento das folhas e a irradiação solar. Em áreas irrigadas os índices de LWP foram mais distinguidos nos mapas em relação aos índices de CT e CWSI.

Falkenberg et al. (2007) também utilizaram IRTs para identificação de áreas de stress biótico e abiótico em uma área de algodão irrigado (Figura 4). Realizou-se esse estudo no Centro de Pesquisa e Extensão em Uvalde (Texas-EUA) utilizando-se um pivô central com aplicação de precisão com baixo consumo energético (LEPA) valendo-se de três regimes de irrigação: 50, 75 e 100% da evapotranspiração da cultura (ETc). De acordo com os resultados apresentados pelos autores pode-se identificar, com o auxílio dessa instrumentação: áreas com podridão nas raízes devido à infestação do agente *Phymatotrichum* (“root rot”) e zonas de manejo de irrigação baseadas na variação de temperatura detectada na área. Verificou-se também que não houve diferença significativa entre as produtividades do algodão irrigado, nas safras de 2002 e 2003, com base em 75% e 100% ETc proporcionando uma economia de água de 25% do volume aplicado.

Figura 4 - Áreas de stress biótico e abiótico em uma área de algodão irrigado

Peters e Evett (2007) analisaram a variabilidade espacial e temporal das condições da cultura da soja utilizando múltiplos mapas de temperatura do dossel monitorados por ITRs instalados ao longo da linha lateral de um pivô central (Figura 5). O equipamento foi instalado em uma área experimental da USDA, na cidade de Bushland, Texas-EUA, em condição de stress hídrico nos anos de 2004 e 2005. Ajustaram-se modelos baseados nos mapas para a predição (no ano de 2007) de produtividade, biomassa e consumo hídrico obtendo-se uma correlação (R^2) em torno de 80%.

Figura 5 – Imagem do mapa da temperatura do dossel monitorada por IRTs

Alguns estudos vêm sendo conduzidos a fim de se obter correlações entre o índice de diferentes vegetações normalizadas (NDVI) e a transpiração da planta. A hipótese que está sendo testada é de que folhas túrgidas refletem uma quantidade de energia e em condições de déficit hídrico, outra quantidade dessa energia. Entretanto algumas críticas ainda são feitas contra essa aplicação, tais como: a resposta em forma de reflectância fornecida por uma folha pode estar bem defasada no tempo, em relação ao momento correto de irrigar. Isso poderia causar um enorme tempo de déficit para planta descaracterizando o manejo de irrigação, que é definido como aplicação de água na quantidade correta e no momento correto; outro fator a se considerar é que determinadas culturas podem se valer de certo potencial osmótico em suas folhas, mesmo que o solo esteja necessitando de água mascarando a necessidade de irrigação.

2.5 Sistemas de aplicação em taxa variada

A literatura relata duas formas principais de se executar a irrigação em taxa variada. A primeira delas se dá por meio de pacotes de aspersores pré-configurados para aplicação de determinadas lâminas, ou seja, a variação da lâmina total segue valores discretos. A segunda forma proposta acontece por meio de pulsos de funcionamento dos aspersores, os quais alternam entre um período de tempo ligado e outro desligado. Por esta forma, a variação da lâmina pode permitir valores contínuos (KING e KINCAID, 2004).

Uma das primeiras tentativas de desenvolvimento de um sistema para irrigação de precisão e bem registrada na literatura foi apresentada no trabalho de Roth e Gardner (1989).

Utilizava-se nesse sistema mais de uma linha de aspersão, sendo que cada uma foi projetada para aplicar uma determinada lâmina de água. Os autores modificaram um sistema de irrigação linear instalando três linhas de aspersores, sendo que as duas primeiras poderiam ser ajustadas para aplicar cinco lâminas diferentes, enquanto a terceira aplicava uma dose uniforme caracterizando o tratamento testemunha. Nesse trabalho, estudou-se a aplicação de água e de nitrogênio pelo sistema.

Outra tentativa subsequente à primeira relaciona-se ao trabalho de Fraisse et al. (1992), e a trabalhos associados, como o de Duke et al. (1992) e Fraisse et al. (1993). Os autores modificaram um sistema linear de irrigação por aspersão para proporcionar aplicações de lâminas de água e quantidades de nutrientes variáveis, através de pulsos de funcionamento dos aspersores. As taxas de aplicação eram definidas pela relação entre tempo ligado e tempo desligado de válvulas solenóides que controlavam os aspersores.

Com base no sistema de Fraisse et al. (1992), Stark et al. (1993) relata em seu trabalho o desenvolvimento de um sistema eletrônico de controle para aplicação de água e nutrientes em taxa variada, para utilização em sistemas lineares de irrigação e em sistema de pivô central. Valendo-se de um microprocessador, o sistema de controle gerenciava alguns grupos de aspersores, a velocidade de caminharmento e a injeção de nutrientes no sistema de irrigação. Esse gerenciamento era realizado de acordo com um mapa espacializado da aplicação.

Fraisse, Heermann e Duke (1995) exploraram a irrigação por pulsos como uma técnica de aplicação variada de água e produtos químicos em um sistema linear de irrigação. Utilizaram-se válvulas solenóides a uma pressão de operação de 35 kPa e uma sub-rotina para simular a aplicação variada de lâmina em condições de pulso. Nesse sistema essa forma de aplicação não resultou em uma diminuição significativa da uniformidade de aplicação, uma vez que se utilizaram pulsos longos, mantendo-se em torno de 90%.

Outros trabalhos como Fraisse et al. (1995); Omary et al. (1997); King e Kincaid (2004); Farahani et al. (2006) apresentam modificações e avaliações desses sistemas apresentados, entretanto não foi alterado o princípio de funcionamento.

Perry e Pocknee (2003) relatam o desenvolvimento de um sistema semelhante ao de Fraisse et al. (1992), entretanto com a integração de um receptor de sinais de sistemas de satélites de navegação global (GNSS) e preparado para avaliações em condição de campo.

Um dos problemas causados pelos sistemas de irrigação de precisão cuja lâmina variável é proporcionada por pulsos, é que a alternância de estado das válvulas solenóides, as quais controlam os aspersores, promove significativa ineficiência energética do sistema de irrigação, uma vez que o sistema de bombeamento permanece sempre ligado mesmo quando, por exemplo, se aplica metade da lâmina total (KING e KINCAID, 2004). Outro problema relatado no trabalho de King e Kincaid (2004) refere-se a não adequação dos aspersores para funcionamento em ritmo intermitente. A resposta dos aspersores convencionais não contempla a mudança rápida de pressão sobre os mesmos, ocasionando variação da uniformidade de aplicação.

2.6 Considerações de projeto

Sadler et al. (2000) citam que o interesse em otimizar o manejo de irrigação e a aplicação de nutrientes levando-se em consideração a variabilidade espacial apresentou um significativo aumento durante a década de 90, devido à utilização de monitores de produtividade de custo mais acessível e a aceitação do estudo pela comunidade científica. O nível e a fonte da variabilidade espacial dependem de muitos fatores, mas, sobretudo sobre os princípios de controle e manejo que devem ser aplicados na maioria dos locais. Em geral as estratégias de manejo (proteção ambiental, conservação dos recursos, custo, etc.) devem ser conhecidas para cada aplicação. Entretanto, o número e o tamanho das zonas de manejo juntamente com o tamanho dos equipamentos de irrigação irão variar de local pra local. Os autores afirmam que a resposta das culturas em relação à aplicação em taxa variada de água, nutrientes e pesticidas deve ser determinada.

Uma vez que essa informação seja adquirida, a combinação de nutrientes e irrigação pode ser determinada para uma zona específica de manejo juntamente com seu sistema de irrigação mais indicado. Pesquisas de vários locais dos EUA contribuíram muito mais para o desenvolvimento dessa informação. Além do mais, *softwares* de controle foram desenvolvidos para manejar a aplicação de fertilizantes e água nessas zonas de manejo, via pivô central e sistema linear de irrigação (SADLER et al., 2000).

Os autores ainda comentam que um projeto aceitável de um equipamento de irrigação de precisão é duplamente complexo. O arranjo de um projeto usual com um projeto tradicional para elaborar um novo equipamento requer várias considerações associadas para se obter um

equipamento de taxa variada. A adição das considerações de projeto desse equipamento inclui: a variação; a causa dessa variação; a necessidade do sistema em atingir a capacidade projetada de manejo; as restrições inerentes a existência do equipamento; inerentes a existência de conhecimento e na filosofia do proprietário e/ou operador. Essas considerações não são mutuamente exclusivas.

A primeira consideração trata do objetivo do manejo projetado ou, em outras palavras, qual o efeito da variação encontrada. Isso pode evitar o stress na cultura ou otimizar o retorno econômico, adaptar a variabilidade do tratamento como em pesquisas experimentais, permitir o déficit ou irrigação parcial de salvamento para solução de problemas de locação de fontes limites, cumprir com a exclusão de zonas quando necessário ou outras restrições regulamentárias, evitar problemas adversos de impacto ambiental como afloramento de rochas, voçorocas, corpos d'água, compactação superficial, assoreamento em lençóis e canais de irrigação.

A segunda consideração refere-se em determinar o objetivo da técnica de manejo adotada. Isso poderia incluir a adaptação: da precipitação ou escoamento superficial causado pela declividade da área; de eventos ou práticas antecedentes; da variabilidade de solo e de outras fontes; ou adaptação da variação espacial de ocorrência de pragas ou armazenamento de nutrientes.

A terceira consideração é objeto do próprio sistema de aplicação. O usuário pode querer manejar a irrigação somente, ou manejar a irrigação e fertilidade, ou manejar tanto a irrigação quanto a fertilidade e a aplicação de pesticidas. Obviamente, para cada uma dessas três situações, o equipamento será um *hardware* acumulado de máquina de irrigação, injeção de fertilizante e pesticida.

Entretanto, outra consideração que requer cuidados se refere à existência do equipamento, conhecimento, e restrições sociais. Se uma máquina já existente pode ser reajustada, se existe o conhecimento histórico de manejo desse equipamento, ou se o operador possui particularidades, o projeto deve ser alterado de acordo com esses casos específicos. Além do mais, pode-se determinar a técnica de manejo a ser escolhida entre a irrigação planejada ou baseada em sensores.

Todas essas considerações abordadas direcionam os objetivos do projeto para a máquina de irrigação. Elas objetivam determinar a resolução espacial necessária, a resolução da variável controle e os controles necessários para atingir o manejo projetado. Pra finalizar, os autores

comentam que até aquela época, existia restrição na seleção de todos componentes de equipamentos de irrigação e equipamentos de fornecimento de água e, é claro, o impacto do custo e benefício econômico em todas as considerações citadas.

2.7 Técnicas para variação de vazão em aspersores

Conhecendo-se a variabilidade espacial de um solo irrigado e sabendo-se que é viável um gerenciamento por meio de irrigação de precisão nessa área, torna-se necessário a aplicação de lâminas diferenciadas de irrigação que podem ser obtidas de duas maneiras. A primeira seria alterando a velocidade de deslocamento do pivô central (controle perimetral) ou do sistema linear de irrigação (controle longitudinal) e a segunda alterando a vazão dos aspersores ao longo da linha lateral do pivô central (controle radial) ou do sistema linear (controle horizontal) visando um controle bidimensional e consequentemente mais eficiente da irrigação. A literatura relata duas formas principais de se executar a irrigação em taxa variada.

2.7.1 Controle da velocidade de deslocamento do equipamento de irrigação

Diversos controladores de velocidade de deslocamento de sistemas lineares de irrigação são apresentados na literatura. Yunseop, Evans e Iversen (2006) por meio de um controlador lógico programável (CLP) controlaram o percentímetro de um sistema de irrigação linear instalado em Sidney na Universidade de Montana, EUA de forma automatizada. Assim, eles conseguiram controlar a velocidade de deslocamento desse sistema, que foi geo-referenciado por meio da instalação de um DGPS.

Queiroz, Botrel e Frizzone (2008) desenvolveram um sistema de aquisição de dados e controle automático da irrigação em pivô central com base na automação de tensiômetros. A comunicação dos tensiômetros com o computador foi realizada via rádio frequência se permitindo o controle da aplicação de água de forma perimetral. A área a ser irrigada foi dividida em um esquema semelhante ao recorte de fatias de pizza recebendo, cada parcela em esquema de fatia, uma lâmina diferenciada de irrigação, de acordo com sua necessidade.

2.7.2 Controle da vazão dos aspersores ao longo da linha lateral

Evans, Benham e Trooien (2000) citam que Lyle e Bordovsky (1983) utilizaram três controladores individuais ao longo de uma linha principal, cada um fornecia uma lâmina discreta, mas com diferentes vazões. De acordo com Camp et. al. (1999) essa técnica foi utilizada pela unidade de pesquisa “*Costal Plains Soil, Water, and Plant*” pertencente à USDA-ARS e situado na cidade de Florença, SC em dois pequenos pivôs centrais. Aplicou-se água em áreas discretas baseada nos tratamentos definidos nesse projeto de pesquisa. A linha principal foi dividida em 13 segmentos, sendo que cada segmento (de 9,1 m) tinha três controladores independentes com tubulações paralelas dotadas de aspersores espaçados a cada 1,5 m (Figura 6). Devido à necessidade de se minimizar a quantidade de água aplicada em um segmento que recebia sobreposição de segmentos adjacentes, escolheram-se aspersores industriais que possuíam diâmetro molhado de 3 a 5 m. As linhas e os aspersores foram selecionados para fornecer 1/7, 2/7 e 4/7 da lâmina de aplicação de referência, embora existisse a possibilidade de aplicação de 0 a 100% da lâmina base valendo-se de todas as combinações das três linhas de alimentação.

Figura 6 - Imagem da técnica utilizada por pesquisadores da USDA-ARS

O sistema de controle utilizado consistia de pequenos computadores 386 conectados via porta serial a um controlador lógico programável (CLP). Esse controlador foi montado sobre a parte móvel do sistema em torno de 5 m do pivô central, sendo conectado com a estação base estacionária primeiramente por um sistema de rádio de telemetria e mais tarde por cabos diretos. O computador *on-board* comparava os dados de posição do painel de controle do pivô referentes

aos específicos ângulos para determinar quando a válvula solenóide deveria ser aberta ou fechada a fim de se aplicar a lâmina de projeto.

Pesquisadores da Universidade de Idaho empregaram uma técnica similar utilizando pares de aspersores com diferentes bocais em três vãos de um sistema linear de irrigação (Figura 7). Entretanto, toda implementação se valeu de diferentes tecnologias. De acordo com McCann et al. (1997) um microprocessador transmitia o sinal necessário de controle através de um simples cabo conectado a válvulas solenóides que direcionavam o fluxo para aspersores apropriados.

Figura 7 - Imagem da técnica utilizada por pesquisadores da Universidade de Idaho

2.8 Sistemas de aplicação em taxa variada

Uma linha de desenvolvimento seguida por alguns autores levava ao estudo de sistemas para quimigação acoplados em sistemas lineares de aplicação ou sistemas de pivô central, ou ainda de pivôs e sistemas lineares capazes de realizarem a quimigação. A quimigação pode ser denominada como a aplicação de qualquer produto químico via água de irrigação. Dowler et al. (1989) apud Alves (2000) comentam que produtos como herbicidas, fungicidas, nematicidas, reguladores de crescimento e agentes de controle biológico podem ser aplicados fazendo-se o uso da quimigação. Os trabalhos de Sumner et al. (2000) e Farahani et al. (2006) apresentam o sistema de quimigação, todos eles fundamentados na alternância de condição ligado e desligado dos aspersores.

Dessa forma, os próprios autores que relataram o problema desenvolveram aspersores adequados ao funcionamento intermitente. Ao invés da alternância entre os estados de tempo ligado e desligado ocorrentes em válvulas solenóides, tal controle se deu diretamente no aspersor. King e Kincaid (2004) desenvolveram um aspersor, para pivô central e/ou sistema linear, que aplicava água com taxa variada. Atingiu-se essa aplicação variada movimentando-se uma haste concêntrica dentro do orifício do aspersor, fornecendo-se um tempo médio de abertura que implicava em uma taxa de aplicação de 36% a 100% da taxa de aplicação de um aspersor

convencional. Entretanto, observou-se que seu raio de aplicação reduziu em torno de 15% em relação a condições normais de operação. Observou-se também que a partir da vazão de 28 L min⁻¹ a vazão teórica se diferiu significativamente da vazão medida.

King et al. (2005) testaram em campo 32 protótipos de aspersores de aplicação variada em três vãos de um sistema linear de irrigação. Desenvolveu-se um algoritmo que efetuou o controle da rede, permitindo-se o controle em grupos de seis ou sete aspersores ao longo da lateral do pivô. Monitorou-se a uniformidade de aplicação que excedeu o valor de 90%. Resultados indicaram que a redução da uniformidade de aplicação de água teve efeito mínimo, utilizando-se 4% de nitrogênio na aplicação.

Dukes e Perry (2006) avaliaram um sistema comercial nomeado *Farmscan Canlink 3000* desenvolvido por pesquisadores da *UGA and Computronics Corp. Ltd.*, em Bentley, Austrália. O sistema é bem semelhante ao de Perry e Pocknee (2003) (Figura 8). Um solenóide com acionamento eletrônico atuava sobre válvulas que controlavam grupos de aspersores que funcionavam de maneira intermitente. Avaliou-se a distribuição de água em um pivô central e em um sistema linear de irrigação se trabalhando em aplicação variável e uniforme de água, sendo que, como resultados, os autores não observaram diferenças entre a qualidade da aplicação em cada condição de funcionamento (DUKES e PERRY, 2006).

Figura 8 - Imagem do Farmscan Canlink 3000. a) compressor de ar. b) esquema completo do sistema

2.8.1 Controle da área do bocal do aspersor

A técnica de se obter um aspersor de vazão variável pode ser realizada variando-se a área do bocal do mesmo aumentando ou diminuindo-se assim seu diâmetro. Essa variação pode ser obtida deslocando-se uma haste dentro do aspersor acionada por válvula solenóide. Em função da frequência de deslocamento da haste fecha ou abre-se seu bocal variando-se a vazão do aspersor. Diversos autores como King e Kincaid (2004) apresentaram trabalhos de construção e avaliação desses aspersores obtendo bons resultados (Figura 9). Todavia, necessita-se de uma válvula solenóide para cada aspersor do sistema de irrigação, caso seja almejado um controle individual de aspersores permitindo um ajuste mais fino da vazão em relação ao controle da vazão de aspersores por pulsos.

Figura 9 - Imagem do aspersor de taxa variada desenvolvido por King e Kincaid (2004)

2.8.2 Controle da frequência de pulsos

Outra técnica que permite variar a vazão de um aspersor, sem necessitar de troca de seu bocal, é o controle da vazão por pulsos. O princípio de funcionamento desse sistema é simples e de fácil entendimento; um aspersor funcionando em modo contínuo fornece uma vazão a uma determinada pressão nominal, contudo instalando-se uma válvula solenóide na entrada de sua alimentação e acionando-a (por meio de microcontroladores ou portas paralelas de microcomputadores) em modo intermitente de funcionamento geram-se pulsos de abertura e

fechamento que restringem a passagem da água pelo aspersor. Assim, por exemplo, energizando-se a válvula solenóide por 30 s e logo após desenergizando-a por 30 s, reduzir-se-á vazão do aspersor em 50% de seu valor nominal. De acordo com Evans, Benham e Trooien (2000), diversos autores como Fraisse et. al. (1992), Duke et. al. (1992), Evans et. al. (1996) e Harting (1999) utilizaram esse mecanismo de variação de vazão. Caso almeje-se o controle individual de cada aspersor necessitar-se-á de uma válvula solenóide para cada aspersor como no método de controle da área do bocal.

Al-Kufaishi et al. (2006) avaliaram o funcionamento de dois aspersores de taxa variada utilizados em irrigação de precisão: pulso com modulação e o bi-modal seqüencial de acordo com índices de uniformidade de distribuição e desempenho de operação em pressões de 1; 1,5 e 2 bar. Conduziram-se vinte e um testes com 90 a 130 medições por cada teste. Os dois sistemas foram avaliados estatisticamente com um difusor de água. Utilizou-se a frequência de três ciclos min^{-1} referente a ciclos de irrigação de 47 a 50% do tempo como proposta de avaliação. Os resultados foram utilizados para simular três áreas abaixo de três vãos do pivô central baseando-se essa simulação no desempenho de um único aspersor. Os resultados revelaram que o sistema de pulso com uma modulação apresentou um desempenho mais eficiente do que o sistema bi-modal seqüencial, e que durante todos os testes, a pressão de 1,5 bar foi a que apresentou os melhores resultados.

Armindo et al. (2009) avaliaram diversas frequências de pulsos em um sistema de vazão em taxa variada controlado por acionamento de válvula solenóide. Os resultados apresentaram que o erro existente entre as vazões estimada e observada assume tendência exponencial a medida que se aumenta a frequência de operação da válvula solenóide.

2.8.3 Controle da injeção de ar no sistema

Camp et al. (1996) e Omary et al. (1996) apresentaram a técnica de injeção de ar aplicada à um aspersor de taxa variada a ser empregado em um sistema linear de irrigação (Figura 10). Basicamente cada torre do sistema linear possui um pequeno reservatório de ar, alimentado por um compressor, que libera uma massa de ar para a tubulação de alimentação dos aspersores. Na entrada da linha de alimentação de um conjunto de aspersores é instalada uma válvula solenóide pneumática que controla o fluxo de entrada de ar. Sendo assim, quanto maior a passagem de ar

pelo aspersor maior é a redução da vazão obtida; a frequência de operação das válvulas solenóides é controlada por meio de um controlador lógico programável (CLP) instalado no painel eletro-eletrônico do sistema linear de irrigação. Essa técnica foi utilizada por Yunseop, Evans e Iversen (2006) em um sistema de irrigação linear instalado em Sidney na Universidade de Montana, EUA.

Figura 10 - Imagem da técnica utilizada por Camp et al. (1996) e Omary et al. (1996)

2.9 Sistemas de posicionamento

A maioria dos sistemas de irrigação por pivô central comercializados para aplicação em taxa variada utiliza um dispositivo conhecido como “resolver” (PETERS e EVETT, 2005). Trata-se de um *encoder*, no qual a rotação de eixo dentro de uma bobina gera uma posição angular conhecida, a partir de uma posição central previamente conhecida por calibração. Este dispositivo, portanto, requer calibração local e não pode ser utilizado em sistemas lineares de irrigação.

Os sistemas que utilizam esse dispositivo têm determinada a posição do primeiro setor do pivô, admitindo-se pequeno desvio dos demais setores no sentido de deslocamento do sistema de irrigação. Esta metodologia assume um erro de posicionamento que varia de acordo com o comprimento do pivô e do tipo de *encoder* utilizado (PETERS e EVETT, 2005). Visando corrigir tais erros de posicionamento, Sadler et al. (2002) utilizam um algoritmo para cálculo da posição dos demais setores a partir da posição do primeiro setor.

Sadler et al. (2000) citam outras estratégias de posicionamento dos sistemas de irrigação, dentre as quais se destacam as bússolas eletrônicas, dispositivos que geram um sinal eletrônico em função do norte verdadeiro. A grande limitação desse sistema, que também requer calibração em campo, é a interferência de corpos metálicos, fontes de energia elétrica, cabos energizados e campos magnéticos.

Os mesmos autores citam que o método mais adequado de posicionamento é por meio de receptores de GNSS, entretanto discorrem que a grande limitação é o custo elevado (SADLER et al., 2000). Peters e Evett (2005) afirmam que a popularização dos receptores de GNSS causou uma acentuada redução no preço dos aparelhos, e que por isso não se justifica a adoção de outra metodologia que não essa.

Heermann et al. (1997) trabalhou com um receptor de GNSS sem correção diferencial para posicionamento de um sistema linear de irrigação, concluindo que esse dispositivo é o método mais viável e fundamental para fins de irrigação de precisão.

Peters e Evett (2005) testaram receptores de GNSS de baixo custo para posicionamento e concluíram que erros de posicionamento menores que 2,1 m foram obtidos em 95% do tempo de ensaio. Entretanto, nos 5% do tempo restante os erros foram maiores que 6,6 m, levando os autores a afirmarem que nessas situações problemas podem ser significativos quando utilizados em irrigação por taxa variada. Os mesmos autores sugerem como solução a utilização de um segundo receptor instalado em posição conhecida para efetuar as correções.

2.10 Motores de passo

Leite et al. (2008) reportam que o motor de passo é um transdutor que converte energia elétrica em movimento controlado através de pulsos, o que possibilita o deslocamento por passo, em que passo é o menor deslocamento angular obtido. Com o passar dos anos houve um aumento na popularidade desse motor, principalmente pelo seu tamanho e custo reduzido além da total adaptação aos controles digitais.

Outra vantagem do motor de passo em relação aos outros motores é a estabilidade. Quando se deseja obter uma rotação específica de certo grau, calcula-se o número de rotação por pulsos o que possibilita uma boa precisão no movimento. Os antigos motores passavam do ponto

e, para voltar, precisavam da realimentação negativa. Por não girarem por passos a inércia desses motores era maior e assim eram também mais instáveis.

O motor de passo é constituído de rotor que nada mais é do que o conjunto eixo-imã que rodam solidariamente na parte móvel do motor e o estator que se define como a trave fixa onde as bobinas são enroladas (Figura 11).

Figura 11 - Imagem das partes que constituem o motor de passo. a) rotor b) estator

2.10.1 Características dos motores de passo

Sem dúvida a característica mais importante ao se escolher o motor é o número de graus por passo que está intensamente vinculado com o número de passos por volta. Os valores mais comuns para essa característica, também referida como resolução, são 0,72; 1,8; 3,6; 7,5; 15 e até 90 graus.

O momento ou torque é o efeito rotativo de uma força, medido a partir do produto da dessa pela distância perpendicular até o ponto em que essa atua partindo de sua linha de ação. Já o momento de frenagem é o momento máximo desempenhado pelo motor de passo com o rotor bloqueado, sem perda de passos. A taxa de andamento seria o regime de operação atingido após uma aceleração suave, o momento de inércia pode ser determinado medindo a resistência mecânica oferecida por um corpo à aceleração angular, a auto-indutância determina a magnitude da corrente média em regimes pesados de operação, de acordo com o tipo de enrolamento do estator, ou seja, relaciona o fluxo magnético com as correntes que o

produzem e as resistências ôhmicas determinam a magnitude da corrente do estator com o rotor parado.

A corrente máxima do estator é determinada pela bitola do fio empregado nos enrolamentos, o *holding* torque é a mínima potência necessária para fazer o motor mudar de posição parado e o torque residual é a resultante de todos os fluxos magnéticos presentes nos pólos do estator. A resposta de passo é o tempo que o motor gasta para executar o comando, a ressonância se refere, como em todo material, a sua frequência natural; quando o motor gira com uma frequência igual a sua, entrando em ressonância, começa a oscilar e a perder passos.

A tensão de trabalho, normalmente impresso no próprio chassi do motor, é a tensão em que trabalha o motor e é fundamental na obtenção do torque do componente. Tensões acima do estipulado pelo fabricante em seu *datasheet* costumam aumentar o torque do motor, porém, tal procedimento resulta na diminuição em sua vida útil. Ressalta-se que a tensão de trabalho do motor não necessariamente deve ser a tensão utilizada na lógica do circuito. Os valores normalmente encontrados variam de +5 Vcc à +48 Vcc.

2.10.2 Tipos de motores de passo

Pode-se dizer que os tipos mais utilizados de motores de passo são o de relutância variável, o de imã permanente e os híbridos.

O de relutância variável apresenta um rotor com muitas polaridades construídas a partir de ferro doce, apresenta também em estator laminado. Por não possuir imã, quando energizado apresenta torque estático nulo. Tendo assim baixa inércia de rotor não podendo ser utilizado com carga inercial grande.

O motor de imã permanente apresenta um rotor de material álico ou ferrite e é magnetizado radialmente, devido a isso o torque estático não se anula.

Os motores híbridos são uma mistura dos dois anteriores e apresentam rotor e estator multidentados. O rotor é de imã permanente e magnetizado axialmente. Apresenta alta precisão, em torno de 3%, boa relação torque/tamanho e ângulos pequenos, de 0,9 e 1,8 graus. Para que o rotor avance um passo é necessário que a polaridade magnética de um dente do estator se alinhe com a polaridade magnética oposta de um dente do rotor.

2.11 Porta paralela

De acordo com Leite et al. (2007), a IBM foi uma das primeiras empresas a desenvolver a porta paralela como uma maneira de ligar a impressora ao computador. Na altura da criação do seu computador, a empresa queria que as impressoras produzidas pela *Centronics*, uma fabricante de primeira linha de impressoras na época, fossem as impressoras padrão usadas nos seus computadores. No entanto, a IBM resolveu não usar no computador a mesma interface de portas que a *Centronics* utilizava nas suas impressoras.

Daí, os engenheiros da IBM uniram um conector de 25 pinos, chamado DB-25, a um conector *Centronics* de 36 pinos para criar um cabo especial para ligar essa respectiva impressora ao computador. Outros fabricantes de impressoras acabaram por adaptar a interface da *Centronics*, tornando-se esse cabo num cabo universal.

É por meio desse conector que se estabelece a comunicação da porta paralela com interfaces conectadas a ela. A ligação externa é efetuada por meio de um conector tipo fêmea DB25 no computador e um conector macho no cabo DB25 (Figura 12).

Figura 12 - Imagem dos conectores DB25 para porta paralela. a) conector macho b) conector fêmea

A porta paralela é formada por 17 linhas de comunicação e 8 linhas que se ligam ao restante (Figura 13).

Figura 13 - Imagem do esquema de ligação dos pinos do conector DB25

Os pinos 2 a 9 são controlados pelo registro de dados tendo como função enviá-los por meio da porta paralela. As novas implementações da porta permitem uma comunicação bidirecional por meio dessas linhas. Os pinos 10, 11, 12, 13 e 15, são usados para troca de mensagens com o mundo externo e o registro que os controla é o registro STATUS. Os pinos 1, 14, 16 e 17, são usados para a interface, controle e troca de mensagens do PC para a impressora restando os pinos de 18 a 25 como massa restante da porta.

Nota-se que existem pinos na porta paralela que trabalham com lógica invertida, ou seja, para ativar esses pinos é preciso enviar um sinal lógico “0” e para desativar, mandar um sinal lógico “1”; portanto, cada pino da porta paralela apresenta uma função (Tabela 1).

Tabela 1 - Funções dos pinos existentes na porta paralela de conector DB-25

Pino N° (DB25)	Nome	I/O	Registo-bit	Invertido
1	<i>nStrobe</i>	<i>Out</i>	<i>Controlo-0</i>	Sim
2	<i>Data0</i>	<i>In/Out</i>	<i>Data-0</i>	Não
3	<i>Data1</i>	<i>In/Out</i>	<i>Data-1</i>	Não
4	<i>Data2</i>	<i>In/Out</i>	<i>Data-2</i>	Não
5	<i>Data3</i>	<i>In/Out</i>	<i>Data-3</i>	Não
6	<i>Data4</i>	<i>In/Out</i>	<i>Data-4</i>	Não
7	<i>Data5</i>	<i>In/Out</i>	<i>Data-5</i>	Não
8	<i>Data6</i>	<i>In/Out</i>	<i>Data-6</i>	Não
9	<i>Data7</i>	<i>In/Out</i>	<i>Data-7</i>	Não
10	<i>nAck</i>	<i>In</i>	<i>Status-6</i>	Não
11	<i>Busy</i>	<i>In</i>	<i>Status-7</i>	Sim
12	<i>Paper-Out</i>	<i>In</i>	<i>Status-5</i>	Não
13	<i>Select</i>	<i>In</i>	<i>Status-4</i>	Não
14	<i>Linefeed</i>	<i>Out</i>	<i>Controlo-1</i>	Sim
15	<i>nError</i>	<i>In</i>	<i>Status-3</i>	Não
16	<i>nInitialize</i>	<i>Out</i>	<i>Controlo-2</i>	Não
17	<i>nSelect-Printer</i>	<i>Out</i>	<i>Controlo-3</i>	Sim
18-25	<i>Ground</i>	-		

2.12 Análise do erro aleatório e erro sistemático

Em todo dado existe um erro, por maior que tenha sido o cuidado ao tomá-lo. Geralmente, dois tipos de erro provenientes de experimentos são os erros aleatórios e sistemáticos.

O erro aleatório visa avaliar o efeito das fontes de variabilidade que afetam os resultados do experimento e que não deveriam existir influenciando dessa maneira a precisão das estimativas dos efeitos dos tratamentos pelo número de repetições; em princípio, quanto maior o número de repetições, maior a precisão. A avaliação do erro aleatório é feita de forma indireta avaliando-se o grau de precisão do experimento. O índice de correlação de Pearson apresentado na eq. (1) é um bom indicador de precisão, uma vez que em sua expressão estão relacionados os dados estimados e observados.

$$r = \frac{N \left(\sum_{i=1}^N E_i O_i \right) - \left(\sum_{i=1}^N E_i \right) \left(\sum_{i=1}^N O_i \right)}{\sqrt{\left[\left(N \sum_{i=1}^N (E_i)^2 \right) - \left(\sum_{i=1}^N E_i \right)^2 \right] \left[\left(N \sum_{i=1}^N (O_i)^2 \right) - \left(\sum_{i=1}^N O_i \right)^2 \right]}} \quad (1)$$

em que:

r: coeficiente de correlação de Pearson;

N: número de repetições;

Ei: i-ésima variável estimada;

Oi: i-ésima variável observada;

O erro sistemático pode ser observado com a determinação da exatidão do sistema e caracteriza o quanto o dado estimado está distante do dado observado. Quanto maior é a proximidade do valor estimado ao valor observado maior é a exatidão e menor é o erro sistemático existente. Para determinar a exatidão de um dado estimado, Willmott (1981) propôs a eq. (2) que ficou estabelecida como índice de concordância de Willmott.

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (E_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^N (|E_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|)^2} \quad (2)$$

em que:

d: Índice de concordância de Willmott;

2.13 Material e métodos

2.13.1 Localização e Etapas do Experimento

A elaboração do aspersor de taxa variada, proposto neste trabalho, foi realizado desenvolvendo-se dois protótipos denominados: Aspersor de Taxa Variada I (ATV₁) e Aspersor de Taxa Variada II (ATV₂). O desenvolvimento dos protótipos ocorreu em quatro etapas distintas. A primeira referiu-se ao projeto e concepção ideológica dos protótipos desenvolvidos. A segunda etapa, onde ocorreram a calibração e a análise dos resultados obtidos, foi realizada no Laboratório de Hidráulica do Departamento de Engenharia Rural na Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” (ESALQ), da Universidade de São Paulo (USP), no município de Piracicaba – SP. Na terceira etapa, realizou-se a montagem do protótipo ATV₂ em campo, em uma área anexa ao Departamento de Engenharia Rural, para realização de ensaios para

determinação de seu perfil radial de distribuição. A quarta etapa destinou-se a automação do protótipo, testado em campo, realizada novamente no Laboratório de Hidráulica.

2.13.2 Referencial Ideológico

Teve-se por objetivo, na idealização e na concepção do protótipo ATV_1 , o projeto de um aspersor de taxa variada construído com equipamentos de fácil construção. Como idéia preliminar, utilizou-se a técnica de construção de um bocal de área variável, valendo-se de um bocal comercial com diâmetro interno de 0,0057 m; e adaptando-se a esse, outras peças como: um conector tipo “Y”; dois *nipples*; uma luva e um *cap*; todos com diâmetro de 0,01874 m (Figura 14).

Figura 14 - Imagem do protótipo ATV_1 . a) Detalhamento do conector tipo “Y”, luva, mancais guias, *nipples* e bocal. b) construção da haste e montagem do ATV_1

Além das peças já citadas, foram utilizados uma haste de ponta cônica, confeccionada de bronze com movimento vertical livre, e dois mancais. A haste possui passo de rosca de 0,00140 m e ângulo de ataque (β) de 14° . Os dois mancais apresentam a função de servirem de base guia para o movimento da haste, e essa, por sua vez, apresenta a função de alterar a área do bocal do aspersor proporcionando assim a variação de vazão (Figura 15).

Figura 15 - Imagem do protótipo construído. a) Vista frontal. b) detalhe em perspectiva

Nos protótipos desenvolvidos o movimento da haste acontece de forma axial e circular comumente reconhecido como um simples movimento de um parafuso.

Concebeu-se o ATV_2 , baseado nos resultados encontrados na avaliação do ATV_1 , a fim de se obter resultados mais satisfatórios. Para construção desse protótipo, continuou-se a seguir a linha de projeto de aspersor com equipamentos de fácil construção alienado a um desempenho considerável. Como idéia preliminar, modificou-se o ATV_1 nos seguintes itens: um conector tipo “Y” com diâmetro de 0,025 m, ao invés de 0,01875 m, e um *niple*, ao invés de dois, além de um corpo extensor, de material PVC, presente desde a luva até o *cap* com a função de diminuir a excentricidade da haste em relação ao centro do bocal. Os dois mancais guias foram mantidos para proporcionar alinhamento à haste que, dessa vez, foi elaborada com um formato de ponta diferenciado da ponta cônica do ATV_1 . A ponta da haste do ATV_2 , assim como o bocal, foi confeccionada de material nylon com ângulo de ataque (β) de $41,58^\circ$ e passo de rosca de 0,0009 m (Figura 16). O bocal do ATV_2 foi construído com diâmetro de 0,010 m com a intenção de proporcionar um aumento significativo da vazão.

Figura 16 - Imagem do segundo protótipo de aspersor de taxa variada desenvolvido

2.13.3 Calibração

Sabe-se que no estudo de bocais de aspersores, a relação vazão *versus* pressão juntamente com o coeficiente de descarga do bocal, rege seus comportamentos. Todavia, nos protótipos desenvolvidos, além desses fatores hidráulicos, o movimento da haste tem papel fundamental no comportamento do aspersor (Figura 17).

Figura 17 - Imagem da haste de ponta cônica para promover a variação da área do bocal

Para cada grau de rotação da haste, ter-se-á uma projeção correspondente de área que limitará assim a área do bocal proporcionando redução ou aumento de vazão (Figura 18). O cálculo da vazão em bocais pode ser estimado por meio da eq. (3).

$$q = cd.S.\sqrt{2gH} \quad (3)$$

em que:

q: vazão; $m^3 s^{-1}$

cd: coeficiente de descarga; adimensional

S: área do bocal; m²

H: pressão de serviço; m.c.a.

Figura 18 - Projeção da área do bocal alterada pelo movimento vertical da haste

Entretanto, pensando-se no funcionamento do protótipo desenvolvido, sabe-se que cada deslocamento vertical (h_2), que passa pelos planos A, B e C, proporcionado pelo movimento da haste, corresponde a uma pequena alteração da área do bocal, o que nos permite inferir que $S = S(h_2)$. Esse deslocamento vertical da haste pode ser determinado pelo produto entre o ângulo de rotação imposto a haste e o passo da rosca, eq. (4).

$$h_2 = \frac{\varphi L}{360} \quad (4)$$

em que:

h_2 : deslocamento vertical da haste, m.

L: passo da rosca; m.

φ : ângulo de rotação imposto a haste; graus.

Dessa forma a área do bocal pode ser determinada pela diferença entre a projeção da área circular externa pela área circular interna.

$$\begin{aligned} S &= S_1 - S_2 \\ S &= \pi r_1^2 - \pi r_2^2 \\ S &= \pi(r_1^2 - r_2^2) \end{aligned} \quad (5)$$

em que:

S_1 : projeção da área circular externa; m^2

S_2 : projeção da área circular interna; m^2

r_1 : raio externo; m

r_2 : raio interno; m

Mas, observando-se novamente a Figura (18) e sabendo-se que r_1 é um valor constante, pode-se encontrar r_2 por

$$r_2 = r_1 - h_2 \operatorname{tg} \alpha \quad (6)$$

Substituindo-se (6) em (5), deduz-se que a área do bocal, para cada posição da haste, pode ser determinada por

$$\begin{aligned} S &= \pi(r_1^2 - r_2^2) \\ S &= \pi[r_1^2 - (r_1 - h_2 \operatorname{tg} \alpha)^2] \end{aligned} \quad (7)$$

Substituindo-se (7) em (3), tem-se um modelo teórico descrito pela eq. (8) que permite estimar a vazão

$$\begin{aligned}
 q &= cd \cdot \pi \left[(r_1^2 - (r_1 - h_2 \operatorname{tg} \alpha)^2) \right] \sqrt{2gH} \\
 q &= cd \cdot \pi \left[(r_1^2 - \left(r_1 - \frac{\phi L}{360} \operatorname{tg} \alpha \right)^2) \right] \sqrt{2gH}
 \end{aligned} \tag{8}$$

e a eq. (9) que permite estimar coeficiente de descarga para os protótipos de aspersores de taxa variada.

$$\begin{aligned}
 cd &= \frac{q_{\text{obs}}}{q_{\text{est}}} = \frac{q_{\text{obs}}}{S \cdot \sqrt{2gH}} \\
 cd &= \frac{q_{\text{obs}}}{\pi \left[(r_1^2 - (r_1 - h_2 \cdot \operatorname{tg} \alpha)^2) \right] \sqrt{2gH}} \\
 cd &= \frac{q_{\text{obs}}}{\pi \left[(r_1^2 - \left(r_1 - \frac{\phi L}{360} \cdot \operatorname{tg} \alpha \right)^2) \right] \sqrt{2gH}}
 \end{aligned} \tag{9}$$

em que:

q_{obs} : vazão observada; $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$

q_{est} : vazão estimada; $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$

Contudo, para entendimento, buscou-se ajustar a partir de dados coletados uma superfície de resposta que represente a vazão dos protótipos para cada par pressão *versus* ângulo de rotação da haste. Construiu-se, portanto, um cubo transparente de ensaios para que se realizasse a coleta de dados durante o processo de calibração. O cubo foi construído de vidro e a tampa de material acrílico com dimensões tais que proporcionaram um volume total de $0,125 \text{ m}^3$. Por meio de uma válvula reguladora de pressão estabeleceu-se a pressão de serviço desejada na entrada dos protótipos, que foi monitorada por leituras realizadas em manômetro digital. Para cada grau de rotação imposto às hastes dos protótipos, realizaram-se leituras de pares de pressão *versus* vazão que foram obtidas por meio de um medidor de vazão magnético, instalado em série no circuito hidráulico montado, e um manômetro digital (Figura 19).

Figura 19 - Imagem do circuito hidráulico montado para realização da calibração do ATV_1

Para a coleta de dados foram estabelecidas as seguintes condições de acionamento da haste: *i)* iniciando-se o movimento da haste com o bocal do aspersor totalmente fechado, o que corresponde à vazão nula do aspersor, ou seja, permitindo que a haste suba seu curso vertical com rotação anti-horária até o limite máximo. *ii)* iniciando-se o movimento da haste com o bocal do aspersor totalmente aberto, ou seja, permitindo que a haste desça seu curso vertical com rotação horária até o limite mínimo. Estabeleceram-se giros de 90° , manualmente com o auxílio de um transferidor fixado sobre aspersor, em cada início de movimento até que as taxas de variação de vazão apresentassem menores valores, a partir daí, giros de 180° e 360° foram impostos a haste.

As pressões utilizadas nos ensaios utilizando o ATV_1 foram estabelecidas com base na pressão mínima de operação de 70 kPa e pressão máxima de 280 kPa de aspersores convencionais, disponibilizadas em catálogos de um fabricante comercial. Assim, estabeleceu-se um intervalo de 30 kPa entre os valores de pressão contidos entre os extremos de mínimo e máximo. Para o ATV_2 , estabeleceu-se a pressão mínima de operação de 50 kPa e máxima de 250 kPa, mantendo-se a um intervalo de 50 kPa entre os valores de pressão utilizados no ensaio de calibração. Realizou-se, a partir dos dados coletados, uma análise de regressão bivariada do tipo $q = q(H, \varphi)$ em busca de uma equação que representasse o comportamento dos dados dos protótipos desenvolvidos.

2.13.4 Ensaios de campo

Em virtude de melhores resultados na calibração, realizou-se a montagem do ATV_2 em uma área gramada para realização de ensaios a fim de determinar seu perfil radial de distribuição

em várias condições de operação. Tanto a montagem quanto o procedimento para avaliação dos ensaios respeitaram as exigências apresentadas pelo item *Procedure for Sprinkler Testing and Performance*, situado na norma *American Society of Agricultural and Biological Engineers* (ASABE).

O protótipo construído foi instalado em uma posição central com coletores distribuídos em um esquema de quatro linhas (Figura 20). A altura existente entre o solo e o topo dos coletores e o espaçamento adotado entre eles foi de 0,50 m; essa configuração proporcionou uma altura entre o topo dos coletores e o bocal do ATV_2 não maior que 0,915 m. Todos os coletores utilizados nos ensaios são idênticos e são os coletores utilizados em ensaios realizados para avaliação de sistemas de aspersão.

Figura 20 – Distribuição das linhas de coletores a serem utilizadas na realização dos ensaios

Para a avaliação do perfil de distribuição de água utilizaram-se dois tipos de defletores rotativos: a) defletor de cor verde, que possui como característica quatro jatos de saída de água; e b) defletor de cor vermelho, que possui como característica seis jatos de saída de água (Figura 21). Esses defletores utilizados são de aspersores convencionais comerciais da empresa fabricante Lindsay.

Figura 21 - Imagem dos refletores rotativos utilizados nos ensaios de campo. a) defletor de quatro jatos. b) defletor de seis jatos

Os ensaios apresentaram tempo de duração de 1 hora monitorando-se suas datas e horários de realização, além dos valores de velocidade e direção do vento, pressão nominal, vazão e rotação do defletor. Os dados referentes a cada linha ensaiada são provenientes de três repetições ocasionando quatro perfis médios de distribuição. A partir daí, determina-se o perfil radial médio de distribuição tomando-se a média dos quatro perfis médios gerados. Os ensaios foram realizados em cinco níveis de pressão de serviço e em cinco ângulos de rotação impostos a haste, o que proporcionou cinco valores de vazão ensaiados (Tabela 2).

Tabela 2 - Valores de vazão ($\text{m}^3 \text{h}^{-1}$) ensaiados em campo para obtenção dos perfis radiais de distribuição do ATV_2 em função de pressão e ângulo de rotação da haste

H (kPa) \ φ (graus)	70	105	140	210	280
2880	2,22				
2520		2,55			
3600			3,40		
3240				3,97	
3960					5,00

A fim de analisar como se comporta o desempenho do ATV_2 operando em baixa, média e alta vazão, para uma mesma pressão, optou-se pela realização de novos testes de campo para uma pressão de 140 kPa, escolhida de forma aleatória. Ângulos de rotação anti-horária de 720, 1800 e 3600 graus foram impostos a haste para proporcionar vazões de 0,96, 2,3 e 3,4 $\text{m}^3 \text{h}^{-1}$ respectivamente. Os ensaios foram conduzidos respeitando-se as mesmas exigências seguidas nos ensaios anteriores, mantendo-se a mesma forma de análise dos resultados esperados.

2.13.5 Automação do protótipo desenvolvido

Em virtude de várias vantagens que a automação pode proporcionar e sabendo-se do alto nível de sua utilização em equipamentos de irrigação do tipo pivô central e sistema linear de irrigação, procurou-se automatizar o movimento da haste por meio da utilização de um motor de passo de características conhecidas (Tabela 3). Esse motor foi comandado por um software construído, para essa finalidade, que enviou os comandos ao motor por meio da porta paralela de um computador (Figura 22).

Tabela 3 - Características do motor de passo utilizado na automação do protótipo desenvolvido

Enrolamento	Tensão	Ângulo de passo	Resistência de fase (Ω)	Corrente (mA)	Holding torque (gf.cm)
Bipolar	12 Vcc	1,8°	30	400	2100

Para garantir torque suficiente ao acionamento da haste no momento em que o protótipo estiver altamente pressurizado, lançou-se mão da utilização de um sistema de polias para amplificar, de certo modo, o torque disponibilizado pelo motor de passo, a fim de que esse seja maior ou igual ao torque requerido pela haste para iniciar seu movimento. A relação entre os diâmetros da polia conectada a haste e da polia conectada ao motor de passo é da ordem de 8,65 vezes, o que representa a proporção de amplificação de torque.

Figura 22 - Imagem do acoplamento do motor de passo a polia de acionamento da haste do protótipo desenvolvido

Para a realização do controle do movimento da haste, torna-se necessário uma adaptação da eq. (8) a fim de se encontrar uma equação em que a variável dependente seja a rotação que a

haste deva realizar para que o aspersor aplique tal vazão a uma dada pressão. Isolando-se a variável rotação (φ) da eq.(8), tem-se a eq. (10).

$$\varphi = \frac{360}{L \cdot \text{tg} \alpha} \left(r_1 - \sqrt{r_1^2 - \frac{q}{\text{cd} \cdot \pi \cdot \sqrt{2gH}}} \right) \quad (10)$$

Essa equação bivariada do tipo $\varphi = \varphi(q, H)$ está inserida no *software* de comando com a seguinte lógica computacional: “para que o ATV₂ aplique uma vazão q a uma dada pressão de serviço H , gire a haste no sentido horário ou anti-horário um ângulo φ ”. O *software* apresenta uma lógica de comando que pode ser descrita por um fluxograma (Figura 23).

Figura 23 - Fluxograma de comando para o acionamento do protótipo desenvolvido. LBI - lâmina bruta de irrigação. RAP - Requerimento de água no ponto. IPAH - Identificação da posição atual da haste. q - vazão

Entretanto, para atingir-se determinada vazão, acionando-se a haste em movimento horário ou anti-horário, ter-se-á primeiramente que verificar o comportamento dos dados observados nos dois sentidos de rotação da haste para comprovar a existência ou não de um efeito de histerese que poderia prejudicar o desempenho do aspersor de taxa variada.

2.14 Resultados e Discussão

2.14.1 Calibração

2.14.1.1 Avaliação para rotação anti-horária da haste

Para a primeira condição de ensaio estabelecida, obtiveram-se tendências distintas dos dados observados dos dois protótipos desenvolvidos (Figura 24).

Figura 24 - Comportamento da vazão em função da rotação anti-horária imposta a haste e das pressões estabelecidas nos ensaios de calibração. a) ATV₁ b) ATV₂

Percebe-se, para o ATV₁, que para cada valor de pressão estabelecido a vazão apresentou um comportamento em relação à rotação que se assemelha a um comportamento potencial. Ademais, torna-se visível que no início do movimento da haste não existiu alteração significativa da vazão que continuou nula até um valor de rotação em torno de 270 graus. Para o ATV₂, percebe-se que os dados de vazão continuaram a apresentar um comportamento potencial em

relação à rotação. Novamente, é visível que no início do movimento da haste também não existiu alteração significativa da vazão, que se manteve praticamente nula até a rotação de 180 graus.

Nota-se uma tendência potencial mais clara para o ATV_2 , uma vez que não existiram oscilações nas tendências de seus dados observados. Nos ensaios de calibração em laboratório com pressão de 250 kPa, atingiu-se um pico de vazão em torno de $4,00 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ impossibilitando, a partir daí, seu funcionamento de maneira estável para a realização de leituras. Portanto, para uma rotação maior que 3000 graus, na condição de pressão de 250 kPa, a vazão apresentou uma alta variância, o que impossibilitou sua determinação (Figura 24-b). Já em campo, ampliou-se esse valor para a vazão de $5,00 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$, a uma pressão de 280 kPa e 3960 graus de rotação.

Analisando-se os dados provenientes do ATV_1 , sem manter fixas as faixas de pressão, e fazendo-se o uso de uma regressão bivariada, obteve-se uma superfície de resposta que representa o comportamento dos dados observados (Figura 25-a).

Figura 25 - Superfícies de resposta para o ATV_1 operado em rotação anti-horária da haste. a) representação dos dados observados em ensaios. b) ajuste para predição de valores pelo modelo teórico

Percebe-se que para cada incremento no par pressão *versus* ângulo de rotação existiu um aumento significativo de vazão. A superfície de resposta se apresentou de maneira regular sem a presença de vales, picos ou pontos de sela significativos que pudessem indicar um comprometimento no funcionamento do protótipo desenvolvido. Trabalhando-se o modelo

teórico proveniente da eq. (8) com os pares, pressão *versus* ângulo de rotação, utilizados na obtenção das vazões observadas, gerou-se uma superfície para predição de vazão (Figura 25-b).

Tomando-se a mesma forma de análise, agora para os dados provenientes do ATV₂, obteve-se uma nova superfície de resposta que representa o comportamento de seus dados observados (Figura 26-a).

Figura 26 - Superfícies de resposta para o ATV₂ operado em rotação anti-horária da haste. a) representação dos dados observados em ensaios. b) ajuste para predição de valores pelo modelo teórico

A superfície de resposta, proporcionada pelos dados coletados durante o funcionamento do ATV₂, se apresenta de maneira bem mais estável, comparada ao ATV₁. Trabalhando-se os dados gerados pela eq. (8) obteve-se a superfície de resposta estimada (Figura 26-b) que representa o ATV₂ em condição anti-horária de rotação da haste.

Comparando-se esses valores simulados aos valores observados por meio de retas 1:1, pôde-se notar o poder de precisão e exatidão do modelo teórico (Figura 27). Percebe-se que o modelo teórico proposto proporcionou maior precisão e exatidão para descrever o funcionamento do ATV₂ comparado a sua aplicação para descrição do funcionamento do ATV₁. Nota-se que houve um aumento acentuado na variância dos dados quando o ATV₁ começou a operar com 50% de sua capacidade operacional, o que não ocorreu em toda faixa operacional do ATV₂.

Figura 27 - Retas de comparação 1:1 entre valores observados e valores estimados pelo modelo teórico em condição de rotação anti-horária da haste. a) ATV_1 . b) ATV_2

Dessa forma, o modelo teórico proposto pela eq. (8) pode ser utilizado para previsão de vazão dos protótipos em ensaios de campo para determinação do perfil radial de distribuição de água e, também para concepção de projetos de novos aspersores de taxa variada. Estatisticamente, percebe-se que o modelo teórico estimou fielmente o comportamento dos dados observados, entretanto analisando-se tecnicamente o funcionamento do ATV_1 percebe-se que ocorreram desvios mais acentuados entre os valores de vazão de $1,0$ e $2,0 \text{ m}^3 \text{h}^{-1}$. A partir de uma análise para uma situação mais crítica, que ocorreu para pressão de 280 kPa e 6120 graus de rotação, percebe-se a existência de um desvio máximo de $0,37 \text{ m}^3 \text{h}^{-1}$ que corresponde a um erro máximo relativo de $18,12\%$ (Figura 28-a). De acordo com esses resultados, torna-se tecnicamente inviável a utilização do ATV_1 em rotação anti-horária, ou seja, abrindo o bocal do aspersor.

Figura 28 - Representação gráfica dos dados observados, simulados e erro para a condição de rotação anti-horária. a) ATV_1 para a pressão máxima de operação de 280 kPa. b) ATV_2 para a pressão máxima de operação de 250 kPa

Já para o ATV_2 , analisando-se a situação mais crítica com pressão de 250 kPa e rotação anti-horária de 1800 graus, constatou-se um desvio máximo $0,18 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ que corresponde a um erro máximo relativo de 5,67% viabilizando tecnicamente a utilização do ATV_2 em rotação anti-horária (Figura 28-b). Ademais, a vazão estável de $5,00 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ obtida com ATV_2 , a uma pressão de 280 kPa, representou um aumento da capacidade desse protótipo em quase 250% em relação a vazão máxima disponibilizada pelo ATV_1 .

Trabalhando-se agora os dados observados durante o funcionamento do ATV_1 , ajustou-se também por regressão bivariada um modelo empírico, com coeficiente de determinação (R^2) de 0,9970 apresentado na eq. (11). Esse modelo disponibilizou, para pressão de 280 kPa e uma rotação de 6120 graus, um desvio máximo de $0,08 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ que corresponde a um erro máximo relativo de 3,97%.

$$z_{ah} = a + bx + cy + dx^2 + ey^2 + fxy + gx^3 + hy^3 + ixy^2 + jx^2y \quad (11)$$

E, trabalhando-se também os dados observados durante o funcionamento do ATV_2 , ajustou-se o modelo empírico representado pela eq. (12) com coeficiente de determinação (R^2) de 0,9964. Analisando-se esse modelo para a situação mais crítica de ensaio, que ocorreu a uma pressão de 250 kPa, constata-se que o desvio máximo ocorreu em torno de 1800 graus com um

valor de $0,03 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ que corresponde a um erro máximo relativo de 1,07% viabilizando a utilização do ATV_2 , com menor erro relativo que o ATV_1 .

$$z_{\text{ah}} = \frac{a + cx + ey + gx^2 + iy^2 + kxy}{1 + bx + dy + fx^2 + hy^2 + jxy} \quad (12)$$

em que:

z_{ah} : vazão para condição de funcionamento da haste em rotação anti-horária, $\text{m}^3 \text{ h}^{-1}$.

x: pressão, m.c.a.

y: rotação anti-horária da haste, graus.

a, b, c, d, e, f, g, h, i, j e k: parâmetros de ajuste das equações.

2.14.1.2 Avaliação para rotação horária da haste

Na condição de movimento horário da haste, percebeu-se que, para o ATV_1 , os dados de vazão também seguiram um comportamento potencial. Todavia, nota-se que entre os valores de 2000 e 4000 graus de rotação ocorreu um salto no valor da taxa de variação de vazão (Figura 29-a). Tal comportamento pode ser explicado pela cavitação ocorrida nos ensaios de laboratório à medida que se reduziu a área do bocal sob altos valores de pressão proporcionando a mudança do regime de escoamento da água nas avaliações.

Figura 29 - Comportamento da vazão em função da rotação horária imposta a haste e das pressões estabelecidas nos ensaios de calibração. a) ATV_1 b) ATV_2

Para o ATV_2 , percebe-se que os dados de vazão também seguiram um comportamento potencial, contudo sem o salto no valor da taxa de variação de vazão, que ocorrera no protótipo ATV_1 (Figura 29-b). Verificou-se, para a situação mais crítica de pressão adotada nos ensaios, que também não se tornou possível a realização de leituras estáveis de vazão nas medições, atingindo-se um valor estável máximo em torno de $4,00 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ e em campo, estabeleceu-se a vazão de $5,00 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ a partir de uma pressão de 280 kPa e 3960 graus de rotação.

Por meio da superfície de resposta pode-se visualizar o comportamento do ATV_1 em rotação horária da haste, notando-se que para cada incremento no par pressão *versus* rotação existe um aumento significativo de vazão (Figura 30-a).

Figura 30- Superfícies de resposta para o ATV_1 operado em rotação horária da haste. a) representação dos dados observados em ensaios. b) ajuste para predição de valores pelo modelo teórico

Entretanto, é notável a presença de vales e picos acentuados em algumas regiões da superfície devido à mudança de regime de escoamento, proporcionada pelo movimento da haste e pelo incremento da energia de velocidade, o que resulta em uma diferença significativa comparada à superfície de resposta predita (Figura 30-b). O modelo teórico estabelecido pela eq. (8) não prevê mudanças de regime de escoamento, o que explica a ausência dos vales e picos na superfície ajustada para predição de vazão.

A superfície de resposta, proveniente de dados observados, que representa o ATV_2 não apresentou a presença de vales e picos, ocasionada pela mudança de regime de escoamento, como ocorrera no ATV_1 (Figura 31-a).

Figura 31 - Superfícies de resposta para o ATV_2 operado em rotação horária da haste. a) representação dos dados observados em ensaios. b) ajuste para predição de valores pelo modelo teórico

Ademais, a superfície de resposta proveniente da eq. (8) representou bem a condição de funcionamento do ATV_2 para a segunda condição pré-estabelecida (Figura 31-b). Tomando-se uma análise do modelo teórico para uma situação mais crítica de funcionamento, que ocorrera na pressão de 280 kPa rotação horária de 6120 graus, identificou-se um desvio máximo de $0,37 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ correspondente a um erro máximo relativo de 18,12% (Figura 32-a).

Figura 32 - Representação gráfica dos dados observados, simulados e erro para a condição de rotação horária. a) ATV_1 para a pressão máxima de operação de 280 kPa. b) ATV_2 para a pressão máxima de operação de 250 kPa

Para o protótipo ATV_2 , encontrou-se um desvio moderado de $0,18 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ que representa um erro relativo máximo de 5,91%, que ocorreu em um ângulo de rotação horária de 1800 graus para a situação mais crítica de pressão ensaiada, estabelecida em 250 kPa. (Figura 32-b). Atualmente, necessita-se da troca de bocais nas práticas de manejo para se obter a vazão desejada nos emissores, no entanto, com o ATV_1 pode-se estabelecer uma vazão de 0 a $2,1 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ e de 0 a $5,00 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ com o ATV_2 . Valendo-se dos dados estimados pelo modelo teórico, e também dos dados observados, percebe-se a superioridade do ATV_2 em relação ao desempenho apresentado pelo protótipo ATV_1 .

As retas de comparação 1:1 indicam o grau de precisão e exatidão da eq. (8) para prever as vazões obtidas nos protótipos desenvolvidos nessa condição pré-estabelecida (Figura 33). Estatisticamente, percebe-se que o modelo teórico representou fielmente o comportamento dos dados observados podendo ser utilizado para representar os protótipos desenvolvidos em rotação horária de funcionamento. Entretanto, novamente, com menor variância nos dados, é notório que a predição para o ATV_2 apresentou maior precisão e exatidão representando integralmente o comportamento dos dados observados. Os resultados obtidos foram fundamentais para a tomada de decisão para escolha do protótipo ATV_2 a ser utilizado em ensaios de campo e automatizado.

Figura 33 - Retas de comparação 1:1 entre valores observados e valores simulados pelo modelo teórico em condição de rotação horária da haste. a) ATV_1 . b) ATV_2

No entanto, trabalhando-se os dados observados durante o funcionamento do ATV_1 , ajustou-se por regressão bivariada o modelo empírico, estabelecido pela eq. (13) com coeficiente de determinação de 0,9933 e que apresenta um desvio que não ultrapassa, em hipótese alguma, o valor de $0,08 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ correspondente a um erro máximo relativo de 4,71% para a rotação de 4680 graus e pressão de 280 kPa.

$$z_h = a + bx + \frac{c}{y} + dx^2 + \frac{e}{y^2} + f \frac{x}{y} + gx^3 + \frac{h}{y^3} + i \frac{x}{y^2} + j \frac{x^2}{y} \quad (13)$$

Novamente, para o funcionamento do ATV_2 , ajustou-se um modelo empírico com coeficiente de determinação de 0,9981 apresentado pela eq. (14). Esse modelo apresentou um desvio máximo de $0,05 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ correspondente a um erro máximo relativo de 15,47% da vazão observada na situação mais crítica de operação que se estabeleceu na pressão de 250 kPa e rotação de 270 graus.

$$z_h = \frac{a + cx + ey + gx^2 + iy^2 + kxy}{1 + bx + dy + fx^2 + hy^2 + jxy} \quad (14)$$

em que:

z_h : vazão para condição de funcionamento da haste em rotação horária, $\text{m}^3 \text{ h}^{-1}$

x: pressão, m.c.a.

y: rotação horária da haste, graus

a, b, c, d, e, f, g, h, i e j: parâmetros de ajuste da equação

2.14.1.3 Modelos para predição de vazão nos aspersores de taxa variada

O modelo a ser adotado para previsão de vazão em um aspersor de taxa variada apresenta importância fundamental em sua concepção, pois um dos aspectos fundamentais que merece discussão na irrigação de precisão é o fator ambiental de quanto se pode economizar de água. Portanto, a avaliação desse modelo deve estar ligada a metrologia e não pura e somente a índices estatísticos, uma vez que um desvio máximo de $0,18 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ pode parecer pequeno com altos índices de precisão e exatidão, mas representa muito em água quando se pensa em um sistema mecanizado de irrigação onde se opera vários desses aspersores (Tabela 3).

Tabela 3 - Índices de desvio máximo e erro relativo para os modelos teórico e empírico na predição de vazão de aspersores de taxa variada

Protótipos	Modelo	Rotação horária		Rotação anti-horária	
		Teórico	Empírico	Teórico	Empírico
ATV ₁	Desvio máximo ($\text{m}^3 \text{ s}^{-1} \times 3600$)	0,37	0,08	0,37	0,08
	Erromáx relativo (%)	18,12	4,71	18,12	3,97
	Pressão (kPa)	280	280	280	280
	Rotação (graus)	6120	4680	6120	6120
ATV ₂	Desvio máximo ($\text{m}^3 \text{ s}^{-1} \times 3600$)	0,18	0,05	0,18	0,03
	Erromáx relativo (%)	5,91	15,47	5,67	1,07
	Pressão (kPa)	250	250	250	250
	Rotação (graus)	1800	270	1800	1800

Apesar dos resultados mostrarem que os modelos empíricos apresentaram menores índices de desvio que o modelo teórico nas condições testadas, optou-se por trabalhar com o modelo teórico por uma série de fatores tais como: *i*) os modelos empíricos foram ajustados a partir de dados observados na calibração, enquanto que o modelo teórico apresenta aplicabilidade para quaisquer aspersores de taxa variada a serem desenvolvidos. *ii*) os modelos empíricos apresentaram uma série de constantes que não podem ser explicadas de maneira física para o melhor entendimento em seus comportamentos, porém o modelo teórico apresenta maior simplicidade e é totalmente explicável quanto aos parâmetros físicos que governam o

funcionamento dos aspersores de taxa variada. *iii*) para a automação da haste no aspersor, torna-se necessário que o *software* de controle do motor de passo calcule a rotação necessária a haste para impor ao aspersor a vazão desejada; no modelo teórico a rotação é facilmente calculada pela eq. (10), porém nos modelos empíricos seria necessário se valer de métodos numéricos e iterativos para se determinar a rotação, uma vez que os modelos empíricos do tipo $\varphi = \varphi(H, q)$ apresentaram coeficientes de determinação (R^2) menores do que 0,80. *iv*) acredita-se em uma maior precisão na construção de aspersores de taxa variada de maneira comercial eliminando-se erros de excentricidade da haste, tornando o modelo teórico cada vez mais próximo a realidade. *v*) trabalhando-se a validação do modelo teórico com valores de vazão de 0 a 74% da capacidade máxima do ATV_1 e de 23 a 97% da capacidade máxima do ATV_2 se aumentaria e muito a exatidão do modelo teórico, pois se reduziria a faixa de erro no coeficiente de descarga, a ser discutida no próximo item.

2.14.1.4 Coeficiente de descarga

Com base na eq. (9) ajustaram-se os coeficientes de descarga (cd) para os protótipos desenvolvidos. Tomou-se a média dos valores de coeficiente de descarga, obtida por meio de três repetições e de uma média entre os dados obtidos a partir dos dois sentidos de rotação da haste. A partir dos resultados encontrados, marcaram-se os valores em gráfico a fim de observar suas tendências (Figura 34).

Figura 34 - Comportamento do coeficiente de descarga função da rotação imposta à haste. a) ATV_1 b) ATV_2

Para o ATV_1 os dados apresentaram a mesma tendência, independentemente da pressão de operação ensaiada, porém encontrou-se uma alta dispersão dos dados. No entanto, para o ATV_2 , os valores se mantiveram com a mesma tendência, mas com uma dispersão mínima. Para os dois protótipos desenvolvidos, nota-se que o coeficiente de descarga apresentou um comportamento crescente até atingir um valor constante. Entretanto, acredita-se que essa faixa de crescimento ocorreu pela excentricidade existente entre pequenos movimentos da haste (h_2) e o bocal nos protótipos desenvolvidos acreditando-se, dessa forma, que em aspersores de taxa variada fabricados com equipamentos de alta precisão esse erro possa não ocorrer. Tomou-se então a média dos valores a partir dos dados que proporcionaram um coeficiente de variação (CV) menor que 10% respeitando-se assim a normalidade dos dados para a obtenção do coeficiente de descarga médio dos protótipos ATV_1 e ATV_2 . Obtiveram-se os valores médios de 0,780 e 0,793; que representam pequena variação no coeficiente de descarga para quaisquer dos protótipos desenvolvidos. Vale ressaltar que os valores descartados, a fim de manter a normalidade dos dados, coincidiram com os valores provenientes do erro de excentricidade fortalecendo assim o comportamento constante dos valores de cd .

A faixa que possui valores de coeficiente de descarga provenientes do erro de excentricidade influenciou a validação do modelo proposto pela eq. (8) quando se realizou a comparação desse modelo a vazões observadas em pressões pré-estabelecidas. Nota-se que para o ATV_1 o número de Reynolds cresceu para cada grau de rotação imposto a haste confirmando que o regime de escoamento variou ao longo do curso da haste (Figura 35). Cada valor apresentado foi resultante da média dos valores obtidos nos dois sentidos de rotação pré-estabelecidos. A não linearidade do coeficiente de descarga promoveu a pequena diferença existente entre os dados observados e estimados.

Figura 35 - Validação do modelo teórico proposto pela eq. (8) em pressões pré-estabelecidas para o ATV_1

Para o ATV_2 , percebe-se que também houve a variação do número de Reynolds, porém com menor influência na predição dos valores (Figura 36). Acredita-se que os pequenos desvios ocorrentes em baixas vazões se deram novamente pela excentricidade da haste enquanto que, os desvios ocorrentes em altas vazões ocorreram em função da maior proporcionalidade da perda de energia advinda da ponta cônica fixada à haste, que se manteve dentro do conector tipo “Y” oferecendo resistência ao escoamento da água.

Figura 36 - Validação do modelo proposto teórico pela eq. (8) em pressões pré-estabelecidas para o ATV₂

2.14.2 Ensaios de campo

Os perfis radiais de distribuição obtidos em diferentes pressões, ângulos de rotação impostos a haste e defletores podem ser visualizados (Figura 37).

Figura 37 - Perfis médios de distribuição do ATV₂ operado em diferentes pressões e vazões e com dois tipos de defletores rotativos

Os alcances máximos referentes a cada perfil foram calculados com base no critério instituído na norma técnica da *ASABE* que estabelece que o alcance deva ser medido a partir do centro aspersor ensaiado até o coletor que receba uma intensidade de precipitação de no mínimo 0,26 mm h⁻¹. Dessa forma, calculou-se o perfil médio com base nas quatro linhas L₁, L₂, L₃ e L₄ ajustando-se polinômios que relacionaram as precipitações dos últimos quatro coletores e o alcance referente a cada coletor. Determinou-se a partir desses polinômios, portanto, os alcances (Tabela 4).

Tabela 4 - Alcance máximo determinado a partir do perfil médio de distribuição referente às condições de operação do ATV₂

H (kPa)	Nº de Jatos	φ (graus)	h ₂ (mm)	q _{est} (m ³ h ⁻¹)	q _{obs} (m ³ h ⁻¹)	Vento		Rotação do defletor (rpm)	Data	Alcance (m)
						v (m s ⁻¹)	Direção			
70	4	2880	7,60	2,16	2,22	0,012	32°N	1,20	13/maio	7,30
105	4	2520	6,65	2,43	2,55	0,098	27°W	1,45	16/maio	8,54
140	4	3600	9,50	3,43	3,50	0,088	18°S	4,26	18/maio	9,79
210	4	3240	8,55	3,99	4,20	0,125	18°S	4,45	20/maio	10,30
280	4	3960	10,45	5,03	5,00	0,100	22°W	12,58	28/maio	10,35
70	6	2700	7,13	2,07	2,07	0,384	2°O	1,69	23/maio	7,53
105	6	2520	6,65	2,43	2,54	0,301	27°W	2,86	17/maio	7,82
140	6	3600	9,50	3,43	3,50	0,089	16°S	4,26	18/maio	8,91
210	6	3240	8,55	3,99	4,20	0,158	2°O	7,31	21/maio	10,38
280	6	3960	10,45	5,03	5,00	0,050	27°W	12,60	29/maio	8,61

Em geral, o ATV₂ aliado ao defletor de quatro jatos proporcionou maiores alcances de aplicação de água, comparado ao defletor de seis jatos. Todavia, esse último proporcionou maiores intensidades de precipitação, além de perfis mais bem distribuídos. Dessa maneira a escolha do defletor a ser utilizado deve acontecer com base na necessidade existente no projeto respeitando-se a diferença nos resultados encontrados. A variância presente entre os quatro perfis, referentes às quatro linhas de disposição dos coletores, pode ser explicada por alguns fatores como: influência da velocidade e direção do vento; a excentricidade entre o jato de água e o centro do defletor, ocasionada pela excentricidade da haste; o pequeno desalinhamento do defletor em relação ao plano de referência; pequenas vibrações do suporte que sustenta o defletor; o pequeno desnível do terreno; entre outros.

A norma técnica seguida nesses ensaios aceita para aspersores com defletores rotativos ensaios com no mínimo uma linha de coletores. Entretanto, por se tratar de um protótipo, optou-se por trabalhar com quatro linhas de coletores tomando-se a média entre elas; ressalta-se que para cada linha foram realizadas três repetições, ou seja, cada perfil médio foi resultado de uma média de doze observações. Contudo, trabalhou-se com dados coletados advindos de ventos que não ultrapassassem a velocidade de 1,3 m s⁻¹, como sugere a norma técnica.

Realizaram-se, portanto, médias de repetições que apresentaram condições de ausência de vento ou com ventos menores que 1,3 m s⁻¹, o que foge do controle das condições experimentais

interferindo assim na garantia de que os tratamentos apresentassem as mesmas condições. Ademais, o anemômetro utilizado informava a distância total percorrida por efeito de vento durante um tempo total de ensaio de 1 h. Novamente, existe uma condição que mascara este tratamento, pois não foi possível determinar possíveis rajadas de vento, uma vez que durante grande parte de um ensaio existia ausência de ventos e durante pequenos instantes de tempo ocorriam ventos certamente com velocidades superiores a $1,3 \text{ m s}^{-1}$. Outro fator importante foi à direção de orientação dos ventos que mudava de uma repetição para outra se estabelecendo como outro efeito sobre os dados trabalhados. Em futuros ensaios de campo recomenda-se a utilização de anemômetros automatizados a um *data logger*, a fim de que se possa obter gráficos que apresentem o comportamento das condições de vento ao longo dos ensaios ou a simples utilização de anemógrafos.

A excentricidade entre o jato de água e o centro do defletor é outra característica que precisa ser muito melhorada em futuros aspersores de taxa variada. Notou-se que para pequenas aberturas do bocal, a direção do jato de água mudava em função da rotação imposta a haste incidindo-se em pontos fora do centro do defletor, o que ocasionava perfis de distribuição totalmente desuniformes. Para corrigir esse problema necessitou-se alinhar o centro do defletor a saída do jato de água em cada vazão a ser testada em campo. Acredita-se que esse problema seja efeito da falta de precisão, no alinhamento da haste, obtida na construção do protótipo que não deve ocorrer na construção de um aspersor de taxa variada comercial.

O suporte construído para servir de base aos defletores testados sofreu uma evolução durante os ensaios de campo sendo outro efeito importante sobre a disposição dos dados. Sob pequenas vazões, o primeiro suporte utilizado operou de maneira estável, mas à medida que se aumentava a pressão ocorreriam fortes vibrações que interferiam no perfil de distribuição. Para eliminar esse efeito, foi necessário introduzir outros suportes chegando-se ao que ofereceu maior resistência à vibração.

Trabalhando-se com quatro linhas de coletores e adotando-se um espaçamento de 0,5 m observou-se uma pequena diferença entre os alcances máximos de cada linha. Em determinadas vazões de ensaio, o jato de água incidia sobre a abertura do último coletor de uma linha e na haste do coletor correspondente na próxima linha acarretando da diferença mencionada. Um pequeno desnível do defletor, uma pequena excentricidade na saída do jato de água ou até mesmo uma

diferença na altura das hastes devido ao pequeno desnível do terreno podem ser fatores que proporcionaram essa diferença nos perfis.

Analisou-se também o desempenho do ATV_2 operando em baixa, média e alta vazão para a pressão de 140 kPa, obtendo-se perfis médios de distribuição (Figura 38).

Figura 38 - Perfis de distribuição do ATV_2 operado em mesma pressão obtendo vazões diferentes em função do movimento da haste

Determinou-se o alcance máximo referente a cada perfil baseado no mesmo critério discutido anteriormente (Tabela 5). Pode-se notar que para vazões de 1,0 a 3,5 m³ h⁻¹, situadas na mesma pressão, o protótipo ATV_2 disponibilizou perfis de distribuição estáveis confirmando assim sua potencialidade de operação sem comprometer a eficiência na aplicação de água nas culturas. Nesse caso, parece não existir diferença significativa entre os alcances obtidos para as vazões de 2,31 e 3,5 m³ h⁻¹, sendo que essa última proporcionou maior intensidade de precipitação, o que pode resultar em menor tempo de irrigação.

Tabela 5 - Valores de alcance obtidos na pressão de 140 kPa para o defletor de quatro jatos

H (kPa)	Nº de jatos	φ (graus)	h_2 (mm)	q_{est} ($m^3 h^{-1}$)	q_{obs} ($m^3 h^{-1}$)	Vento		Rotação do defletor (rpm)	Data	Alcance (m)
						v ($m s^{-1}$)	Direção			
140	4	720	1,90	0,99	0,99	0,317	16°S	0,40	25/maio	7,96
140	4	1800	4,75	2,2	2,31	0,024	32°N	2,01	24/maio	8,69
140	4	3600	9,50	3,43	3,5	0,089	16°S	4,26	18/maio	8,91

2.14.3 Automação do protótipo desenvolvido

A comparação entre os dados observados durante o funcionamento do protótipo ATV_2 , tanto em rotação horária quanto em rotação anti-horária de sua haste, confirmou a não existência do fenômeno de histerese, que poderia comprometer o desempenho do protótipo desenvolvido. Analisando-se a reta 1:1, percebe-se que não houve diferença estatística entre os resultados, uma vez que o coeficiente angular da reta tende a ser unitário e o coeficiente linear inexiste (Figura 39).

Figura 39 - Comparação entre os dados observados de vazão em rotação horária e anti-horária da haste do protótipo ATV_2

A partir daí, realizou-se o acoplamento final do motor de passo à polia responsável pelo acionamento da haste conseguindo-se com essa polia maior precisão no ajuste da vazão no ATV_2 (Figura 40). O movimento da haste foi comandado por meio do acionamento da porta paralela de um microcomputador, que por sua vez recebeu comandos de um *software* de controle desenvolvido em linguagem pascal em ambiente *Delphi*. Esse software habilita sinais na porta

acionando o *driver* de potência de acordo com a necessidade de rotação do motor de passo. Dessa forma, o motor acionou a polia implicando movimento horário ou anti-horário a haste como o esperado. Ressalta-se ainda que a rotação necessária encontrada na eq. (10) para atender a vazão desejada foi multiplicada pela constante “8,65”, que representa a relação entre os diâmetros das polias; e que o torque necessário para que a haste entrasse em movimento foi determinado em campo, encontrando-se o valor de 0,270N.m em condição de não pressurização do aspersor.

Figura 40 - Imagens do acoplamento final do motor de passo ao ATV_2

Além do ajuste mais preciso na obtenção da vazão desejada no aspersor desenvolvido, a automação por acionamento do motor de passo possui outra vantagem que é seu regime de funcionamento alternado. Após a obtenção da vazão desejada o motor permanece desligado esperando uma nova ação de comando permitindo assim economia de energia, além de uma esperança maior de vida útil do sistema.

2.14.4 Quimigação

Há indícios de que o ATV_2 possa ser utilizado em aplicações de produtos químicos via água de irrigação quando essas apresentarem como alvo a estrutura foliar da planta. Sabe-se que esse tipo de aplicação não é recomendável quando se utiliza aspersores de equipamentos de aspersão mecanizável do tipo pivô central ou sistema linear de irrigação. Os aspersores convencionais utilizados nesses equipamentos são projetados para aplicar vazões elevadas e com consideráveis diâmetros de gota, o que proporciona um escorrimento do ingrediente ativo não

permitindo sua adesão à folha. Para suprir este objetivo, os *sprays* pulverizadores devem proporcionar gotas com diâmetros na casa de micrometros garantindo assim maior uniformidade no molhamento da folha. Operando-se o ATV_2 a uma pressão de 280 kPa e com uma pequena abertura de bocal referente a 90° de rotação na haste, obteve-se uma vazão de aproximadamente 188 L h^{-1} que proporcionou gotas, em caráter visual, de *sprays* pulverizadores (Figura 41). Evidentemente, futuros testes com papéis adesivos que auxiliem na determinação do diâmetro médio volumétrico (DMV) e do diâmetro médio numérico (DMN), bem como testes para a determinação do perfil de aplicação do ATV_2 operado nessas condições necessitam ser realizados comprovando, ou não, esta característica adicional ao aspersor de taxa variada que garantiria ainda uma maior versatilidade. Caso se confirme esse indício, poder-se-á utilizar o mesmo equipamento tanto para irrigação convencional, quanto para a irrigação de precisão e para quimigação.

Figura 41 – Imagem do ATV_2 operado em condições de formação de *spray* com gotas mais finas.
a) defletor fixo utilizado. b) imagem do aspecto visual do *spray* de gotas finas

3 CONCLUSÃO

Considerando os resultados encontrados e as condições do trabalho desenvolvido, conclui-se que:

É possível e viável tecnicamente a construção de um aspersor de taxa variada para ser utilizado em projetos de irrigação de precisão.

É possível estimar a vazão de um aspersor de taxa variada em, qualquer condição de operação, utilizando-se o modelo teórico proposto.

Em se tratando de irrigação convencional, o aspersor de taxa variada também possui alta aplicabilidade uma vez que, com sua utilização, poder-se-á eliminar a troca de bocais para se obter a vazão desejada realizando-se manualmente o ajuste da vazão em cada aspersor.

Com o aspersor desenvolvido, pode-se agora atender a variabilidade espaço-temporal da demanda hídrica de uma área qualquer. Contudo, outros aspersores de taxa variada devem ser construídos e avaliados com o propósito de alcançar melhores resultados a fim de se proporcionar maior otimização na utilização dos recursos hídricos na irrigação.

REFERÊNCIAS

AL-KUFAISHI, S.A.; BLACKMORE, B.S.; SOURELL, H. The feasibility of using variable rate water application under a central pivot irrigation system. **Irrigation and Drainage Systems**, Springer Netherlands, v. 20, p.317-327, Aug, 2006.

ARMINDO, R.A.; BOTREL, T.A.; DOURADO NETO, D.; MOURÃO G.B. Avaliação do sistema de pulverização com funcionamento intermitente, acoplado a pivô central, Notliada. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.13, p.26-32, 2009.

BUCHLEITER, G.W.; WESTRA, P.; PEAIRS, F.B.; FLEMING, K. Interdisciplinary irrigated precision farming research. **Precision Agriculture**, Oxford, v. 3, p. 47-61, 2002.

BURGESS, T.M.; WEBSTER, R. Optimal interpolation and isarithmic mapping of soil properties. I. The semivariogram and punctual kriging. **Journal of Soil Science**, Oxford, v. 31, p. 315-331, 1980.

CHEEROO-NAYAMUTH, F.C.; ROBERTSON, M.J.; WEGENER, M.K.; NAYAMUTH, A.R.H. Using a simulation model to assess potential and attainable sugar yield in Mauritius. **Field Crops Research**, Amsterdam, v.66, p.225-243, 2000.

CAMP, C.R.; SADLER, E.J. Irrigation, deep tillage, and nitrogen management for a corn-soybean rotation. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v.45, n.3, p. 601-608, 2002.

CAMP, C.R.; SADLER, E.J.; EVANS, D.E.; USREY, L.J.; OMARY, M. Modified center pivot system for precision management of water and nutrients. **ASAE Annual International Meeting**, Phoenix. Paper 96-2077, 1996.

CORWIN, D.L., LESCH, S.M. Apparent soil electrical conductivity measurements in agriculture. **Computers and Electronics in Agriculture**, Amsterdam, v.46, p.11-43, 2005. www.elsevier.com/locate/compag

CORWIN, D.L., PLANT, R.E. Applications of apparent soil electrical conductivity in precision agriculture. **Computers and Electronics in Agriculture**. v.46, p.1-10, 2005. www.elsevier.com/locate/compag

DEBOER, J.L.; GRIFFIN, T. Adoption and profitability of precision agriculture worldwide. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGRICULTURA DE PRECISÃO.2006. Piracicaba. **Anais...**, Piracicaba:Universidade de São Paulo/Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, 2006. p. 36-40.

DEBOER, D.W.; BECK, D.L.; BENDER, A.R. A field evaluation of low, medium and high pressure sprinklers. **Transactions of ASAE**, St. Joseph, v.35, n.4, p. 1185-1189, 1992.

DEJONGE, K.C.; KALEITA, A.L.; THORP, K.R. Simulating the effects of spatially irrigation on corn yields, costs, and revenue in Iowa. **Science Direct Journal**, Amsterdam, v.92, p.99-109, 2007.

DUKE, R.H.; HEERMANN, F.D.; DAWSON, J.L. Appropriate depth of application for scheduling central pivot irrigation. **Transactions of ASAE**, St. Joseph, v. 35, n.5, p. 1457-1464, 1992.

DUKE, H.R.; HEERMANN, D.F.; FRAISSE, C.W. Linear move irrigation system for fertilizer management research. In: INTERNATIONAL EXPOSITION AND TECH CONF.,1.992. New Orleans. **Proceedings...** La. Fairfax, Va.: The Irrigation Assoc., 1992.p. 78-81..

DUKES, M.D.; PERRY, C. Uniformity testing of variable-rate center pivot irrigation control systems. **Precision Agriculture**, Oxford, v. 7, p. 205-218, 2006.

EVANS, R.G.; HARTING, G.B. Precision irrigation with center pivot systems on potatoes. In: ASCE INTERNATIONAL WATER RESOURCES ENGINEERING CONFERENCE. 1999. **Proceedings...**Seattle, WA, 1999. p. 8-11.

EVANS, R.G.; HAN, G.S.; SCHNEIDER, S.M.; KROEGER, M.W. Precision center pivot irrigation for efficient use of water and nitrogen. .ROBERT,P.C..RUST, R.H ; LARSON, W.E.(Ed.). In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON PRECISION AGRICULTURE, 3., 1996. Madison. **Proceedings...** Madison, WI.:ASA, 1996. p. 75-84.

EVANS, D.E.; SADLER, E.J.; CAMP, C.R.; MILLEN, J.A. Spatial canopy temperature measurements using center pivot mounted IRTS In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON PRECISION AGRICULTURE, 50., 2000. Bloomington. 2000. **Proceedings...**Minnessota 2000. p.1-11.

FALKENBERG, N.R.; PICCINNI, G.; COTHREN, J.T.; LESKOVAR, D.I.; RUSH, C.M. Remote sensing of biotic and abiotic stress for irrigation management of cotton. **Science Direct Journal**, Amsterdam, v.87, p.23-31, 2007.

FARAHANI, H.J.; SHANER, D.L.; BUCHLEITER, G.W.; BARTLETT, G.A. Evaluation of a low volume agro-chemical application system for center pivot irrigation. **Applied Engineering in Agriculture**, St. Joseph, v.22, n.4, p. 517-528, 2006.

FRAISSE, C.W. **Variable water application with moving irrigation systems**. Dissertation - (Ph.D.) – 1993. p. 1363-1369. Agricultural and Chemical Engineering Dept., Colorado State Univ., Fort Collins, 1993.

FRAISSE, C.W.; HEERMANN, D.F.; DUKE, H.R. Modified linear move system for experimental water application. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ADVANCES IN PLANNING, DESIGN AND MANAGEMENT OF IRRIGATION SYSTEMS AS RELATED TO SUSTAINABLE LAND USE, 1., 1992. Leuven. **Proceedings...** Leuven, Belgium: Center for Irrigation Engineering, 1992. p.367-376

FRAISSE, C.W.; HEERMANN, D.F.; DUKE, H.R. Simulation of variable water application with linear-move irrigation systems. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v.38, n.5, p. 1371-1376, 1995.

GUIMARÃES, R.M.L; BLAINSKI, E.; GONÇALVES, A.C.A.; REZENDE, R.; FOLEGATTI, M.V. Distribuição espacial de lâmina de irrigação e de armazenamento de água no solo sem cobertura vegetal. In: **CONGRESSO BRASILEIRO DE AGRICULTURA DE PRECISÃO**. 2006. Piracicaba. Anais Piracicaba, 2006. 1 CD-ROM

HEERMANN, D.F.; BUCHLEITER, G.W.; BAUSCH, W.C.; STAHL, K. Nondifferential GPS for use on moving irrigation systems. In: EUROPEAN CONF. ON PRECISION AGRICULTURE (ECPA), 1997. Warwick **Proceedings...** Warwick: University, UK, 1997. v.2, p.567-574.

HEERMANN, D.F.; HOETING, J.; THOMPSON, S.E.; DUKE, H.R.; WESTFALL, D.G.; BUCHLEITER, G.W.; WESTRA, P.; PEAIRS, F.B.; FLEMING, K. Interdisciplinary irrigated precision farming research. **Precision Agriculture**, Oxford, v. 3, p. 47-61, 2002.

HORVAT, R.A.; XAVIER, M.A.; GREGO, C.R.; VIEIRA, S.R. Avaliação da variabilidade espacial do número de perfilhos da cultura de cana-de-açúcar em relação à compactação do solo.

In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGRICULTURA DE PRECISÃO, 2006. São Pedro- SP, **Anais...**Piracicaba: ESALQ, 2006.

JACKSON, T.; MANSFIELD, K.; SAAFI, M.; COLMAN, T.; ROMINE, P. Measuring soil temperature and moisture using wireless MEMS sensors. **Science Direct Journal**, Amsterdam , v.41, p.381-390, 2008.

KARLEN, D.L.; SADLER, E.J.; BUSSCHER, W.J. Crop yield variation associated with Coastal Plain soil map units. **Soil Science Society American Journal**, Madison, v. 54, n.3, p. 859-865, 1990.

KING, B.A.; WALL, R.W. Supervisory control and data acquisition system for site-specific center pivot irrigation. **Applied Engineering in Agriculture**, St. Joseph, v.14, n.2, p. 135-144, 1998.

KING, B.A.; KINCAID, D.C. A variable flow rate sprinkler for site-specific irrigation management. **Applied Engineering in Agriculture**, St. Joseph, v.20, n.6, p. 765-770, 2004.

KING, B.A.; STARK, J.C.; McCANN, I.R.; WESTERMAN, D.T. Spatially varied nitrogen application through a center pivot irrigation system. ROBERT, P.C.; RUST, R.H.; LARSON, W.E.(Ed.). In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON PRECISION AGRICULTURE, 3., 1996. Madison. **Proceedings...** Madison, WI.:ASA, 1996. p.85-94.

KING, B.A.; McCANN, I.R.; EBERLEIN, C.V.; STARK, J.C. Computer control system for spatially varied water and chemical application studies with continuous move irrigation systems. **Computers and Electronics in Agriculture**, Amsterdam, v. 24, p. 177-194, 1999.

KING, B.A.; WALL, R.W.; KINCAID, D.C.; WESTERMANN, D.T. Field Testing of a variable rate sprinkler and control system for site-specific water and nutrient application. **Applied Engineering in Agriculture**, St. Joseph, v.21, n.5, p. 847-853, 2005.

KUSTAS, W.P.; NORMAN, J.M. Use of remote sensing for evapotranspiration monitoring over land surfaces. **Hydrological Sciences**, Oxford, v. 41, n. 4, p.495-516, 1999.

LASCANO, R.J. BAUMHARDT, R.L.; HICKS, S.K.; LANDIVAR, J.A. Spatial and temporal distribution of surface water content in a large agricultural field. ROBERT, P.C.; RUST, R.H.; LARSON, W.E.(Ed.). In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON PRECISION AGRICULTURE, 4, 1999. Madison. **Proceedings...** Madison, WI.:ASA, 1999. p. 19-30.

LECHNER W.; BAUMANN S.; Global navigation satellite systems. **Computers and Electronics in Agriculture**, Linden, v..25, p.67-85, 2000. TELEMATICA, Baiernrainer Weg 6, 83623 Linden, Germany www.elsevier.com/locate/compag

LEITE, B.H.F.C.; LIMA, E.J.C.; LEÃO, F.L.; PRESTES, R.F. Estudo do motor de passo e seu controle digital. 2008.10p. Disponível em:<<http://www2.eletronica.org/artigos/outros/estudo-do-motor-de-passo-e-seu-controle-digital>>. Acesso em: 30 abr. 2009.

LOGSDON, S.; PRUGER, J.; MEEK, D.; COLVIN, T.; JAMES, D.; MILNER, M. Crop yield variability as influenced by water in rain-fed agriculture. ROBERT, P.C.; RUST, R.H.; LARSON, W.E.(Ed.). In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON PRECISION AGRICULTURE, 4, 1999. Madison. **Proceedings...** Madison, WI.:ASA, 1999. p.453-465.

McBRATNEY, A.B.; WEBSTER, R. Choosing functions for semi-variograms of soil properties and fitting them to sampling estimates. **Journal of Soil Science**, Madison, v. 37, p. 617-639, 1986.

MEIRELES, E.J.L.; PEREIRA, A.R.; SENTELHAS, P.C.; STONE, L.F.; ZIMMERMANN, F.J.P. Calibration and test of the cropgro-dry bean model for edaphoclimatic conditions in the savannas of central brazil. **Scientia Agricola**, Piracicaba,v.59, p.723-729, 2002.

MEIRELES, E.J.L.; PEREIRA, A.R.; SENTELHAS, P.C.; STONE, L.F.; ZIMMERMANN, F.J.P. Risco climático de quebra de produtividade da cultura do feijoeiro em Santo Antônio de Goiás, GO. **Bragantina**, Campinas v.62, n.1, p.163-171, 2003.

MORAN, M.S.; JACKSON, R.D. Assessing the spatial distribution of evapotranspiration using remotely sensed inputs. **Journal of Environmental Quality**, Madison, v.20, p. 725-737, 1991.

OLIVEIRA, C.W.; YODER, R.E.; WILKERSON, J.B.; YODER, D.C.; LARSON, J.A. Delineation of management units for site-specific irrigation. **ASAE Paper** 032145, 2003.

OLSON, K. Precision agriculture: current economic and environmental issues. In: JOINT CONFERENCE ON FOOD, AGRICULTURE AND THE ENVIRONMENT. UNIVERSITY OF MINNESOTA, 6., 1998. ST. PAUL, MN **Proceedings....** ST. PAUL 31 AUG – 2 SEPT 1998. 31p.

OMARY, M.; CAMP, C. R.; SADLER, E. J. Center pivot irrigation system modification to provide variable water application depths. **Applied Engineering in Agriculture**, St. Joseph, v.13, n.2, p. 235-239, 1997.

OTTOMAN, M. J.; POPE, N. V. Nitrogen Fertilizer Movement in the Soil as Influenced by Nitrogen Rate and Timing in Irrigated Wheat. **Soil Science Society American Journal**, Madison, v.64, p. 1883-1892, 2000.

QUEIROZ, T.M. **Desenvolvimento de um sistema automático para irrigação de precisão em pivô central**. 2007. 141p. Tese (Doutorado em Irrigação e Drenagem) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2007.

QUEIROZ, T.M.; BOTREL, T.A.; FRIZZONE, J.A. Desenvolvimento de *software e hardware* para irrigação de precisão usando pivô central. Jaboticabal, **Revista Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.28, n.1, p. 44-54, 2008.

PERRY, C.; POCKNEE, S. Precision pivot irrigation controls to optimize water application. In: Understanding & Addressing conservation and recycled water irrigation. 2003. San Diego. **Proceedings...** San Diego, CA2003. p. 86–92,

PETERS, R.T.; EVETT, S.R. Using low-cost GPS receivers for determining field position of mechanized irrigation systems. **Applied Engineering in Agriculture**, St. Joseph, v.21, n.5, p. 841-845, 2005.

PETERS, R.T.; EVETT, S.R. Spatial and temporal analysis of crop conditions using multiple canopy temperature maps created with center-pivot-mounted infrared thermometers. **Transactions of ASABE**, St. Joseph, v.50, n.3, p.919-927, 2007.

RIJSBERMAN, F.R. Water scarcity: fact or fiction? **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v.80, p. 5-22, 2006.

ROBERT, P.C. Precision agriculture: a challenge for crop nutrition management. **Plant and Soil**, Dordrecht, v.247, p. 143-149, 2002.

ROTH, R.L.; GARDNER, B.R. Modified self-moving irrigation system for water-nitrogen crop production system. **Applied Engineering in Agriculture**, St. Joseph, v.5, n.2, p. 175-179, 1989.

STARK, J.C.; McCANN, I.R.; KING, B.A.; WESTERMANN, D.T. A two-dimensional irrigation control system for site-specific application of water and chemicals. **Agronomy Abstracts**, Madison, v.85, p. 329-338, 1993.

SADLER, E.J., CAMP, C.R.; EVANS, D.E.; MILLEN, A.J. Corn canopy temperatures measured with measured with a moving infrared thermometer array. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v.45, n.3, p.531-591, 2002a.

SADLER, E. J.; CAMP, C. R.; EVANS, D. E.; MILLEN, J.A. Spatial variation of corn response to irrigation. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v.45, n.6, p. 1869-1881, 2002b.

SADLER, E.J.; CAMP, C.R.; EVANS, D.E.; URSEY, L.J. A site-specific center pivot irrigation system for highly variable coastal plain soils. EDS..ROBERT, P.C ; RUST, R.H.; LARSON W.E.(Ed.). In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON PRECISION AGRICULTURE, 1996.Madison, WI. **Proceedings...**Madison, WI.:ASA, 1996. p. 827-834.

SADLER, E.J.; EVANS, R.G.; STONE, K.C.; CAMP, C.R. Opportunities for conservation with precision irrigation. **Journal of Soil and Water Conservation**, Ankeni, v.60, n.6, p. 371-379, 2005.

SADLER, E.J.; EVANS, R.G.; BUCHLEITER, G.W.; KING, B.A.; CAMP, C.R. Design considerations for site specific irrigation: In: NATIONAL IRRIGATION SYMPOSIUM,4., 2000.Phoenix. **Proceedings...** Phoenix, Arizona: ASAE. November, 2000. p. 1-12.

SILVA, C.B.; do VALE, S.M.L.; PINTO, F.A.C.; MÜLLER, C.A.S.; MOURA, A.D. The economic feasibility of precision agriculture in Mato Grosso do Sul state, Brazil: a case study. **Precision Agriculture**, New York, v.8, p.255-265, 2007.

STARK, J.C.; McCANN, I.R.; KING, B.A.; WESTERMANN, D.T. A two-dimensional irrigation control system for site-specific application of water and chemicals. **Agronomy Abstracts**, Madison, v.85, p. 329-338, 1993.

STARR, G.C. Assessing temporal stability and spatial variability of soil water patterns with implications for precision water management. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v.72, p.223-243, 2005.

STONE, K.C.; SADLER, E.J.; MILLEN, J.A.; EVANS, D.E.; CAMP, C.R. Water flow rates from a site-specific irrigation system. **Applied Engineering in Agriculture**, St. Joseph, v.22, n.1, p. 73-78, 2006.

SUMNER, H.R.; DOWLER, C.C.; GARVEY, P.M. Application of agrichemicals by chemigation, pivot-attached sprayer systems, and conventional sprayers. **Applied Engineering in Agriculture**, St. Joseph, v.16, n.2, p. 103-107, 2000.

SUMNER, H.R.; GARVEY, P.M.; HEERMANN, D.F.; CHANDLER, L.D. Center pivot irrigation attached sprayer. **Applied Engineering in Agriculture**, St. Joseph, v.13, n.3, p. 323-327, 1997.

VELLIDIS, G.; TUCKER, M.; PERRY, C.; KVIEN, C.; BEDNARZ, C. A real-time wireless smart sensor array for scheduling irrigation. **Agricultural Water Management**, Amsterdam v.61, p.44-50, 2007.

WEBTUGA. Estudo do motor de passo e seu controle digital. 2006.8p. Introdução a porta paralela: O conector DB-25. Disponível em:< <http://www.tugatronica.com/iii-introducao-a-porta-paralela/>>. Acesso em: 02 fev. 2009.

YUNSEOP, K.; EVANS, R.G; IVERSEN, W.M. Evaluation of Wireless Control for Variable Rate Irrigation. **In: ASABE ANNUAL INTERNATIONAL MEETING**. 2006. Portland. Anais, Portland, 2006.

YUNSEOP, K.; EVANS, R.G; IVERSEN, W.M. Remote sensing and control of an irrigation system using a distributed wireless sensor network. **IEEE Transactions on instrumentation and measurement**, Paper 0018-9456, 2008.