

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JULIO DE MESQUITA FILHO”  
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS  
CÂMPUS DE BOTUCATU

**DIMENSIONAMENTO DA LINHA LATERAL UTILIZANDO DOIS  
ESPAÇAMENTOS ENTRE GOTEJADORES**

**RAFAEL LUDWIG**

Dissertação apresentada à Faculdade de Ciências Agronômicas da UNESP – Campus de Botucatu, para obtenção do título de Mestre em Agronomia (Irrigação e Drenagem).

BOTUCATU-SP  
Fevereiro – 2012

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JULIO DE MESQUITA FILHO”  
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS  
CÂMPUS DE BOTUCATU

**DIMENSIONAMENTO DA LINHA LATERAL UTILIZANDO DOIS  
ESPAÇAMENTOS ENTRE GOTEJADORES**

**RAFAEL LUDWIG**

Orientador: João Carlos Cury Saad

Dissertação apresentada à Faculdade de Ciências Agronômicas da UNESP – Campus de Botucatu, para obtenção do título de Mestre em Agronomia (Irrigação e Drenagem).

BOTUCATU-SP  
Fevereiro – 2012

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA "JÚLIO DE MESQUITA FILHO"**  
**FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS**  
**CAMPUS DE BOTUCATU**

**CERTIFICADO DE APROVAÇÃO**

**TÍTULO: "DIMENSIONAMENTO DA LINHA LATERAL UTILIZANDO DOIS  
ESPAÇAMENTOS ENTRE GOTEJADORES"**

ALUNO: RAFAEL LUDWIG

ORIENTADOR: PROF. DR. JOÃO CARLOS CURY SAAD

Aprovado pela Comissão Examinadora



---

PROF. DR. JOÃO CARLOS CURY SAAD



---

PROF. DR. RODRIGO MÁXIMO SANCHES ROMÁN



---

PROF. DR. EDSON EJI MATSURA

Data da Realização: 23 de fevereiro de 2012.

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA SEÇÃO TÉCNICA DE AQUISIÇÃO E TRATAMENTO DA INFORMAÇÃO - SERVIÇO TÉCNICO DE BIBLIOTECA E DOCUMENTAÇÃO - UNESP - FCA - LAGEADO - BOTUCATU (SP)

L948d Ludwig, Rafael, 1986-  
Dimensionamento da linha lateral utilizando dois espaçamentos entre gotejamentos / Rafael Ludwig. - Botucatu : [s.n.], 2012  
xi, 66 f. : il., tabs.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrônômicas, Botucatu, 2012

Orientador: João Carlos Cury Saad  
Inclui bibliografia

1. Cultivos agrícolas - Irrigação. 2. Irrigação agrícola. 3. Irrigação por gotejamento. 4. Vazante. I. Saad, João Carlos Cury. II. Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" (Campus de Botucatu). Faculdade de Ciências Agrônômicas. III. Título.

**OFEREÇO**

*Aos meus pais, Vera Lúcia Pagliarini Ludwig e  
Hilário Luiz Ludwig, por todo o amor e dedicação.*

## **AGRADECIMENTOS**

A Universidade Estadual Paulista “Júlio mesquita Filho” pela oportunidade concedida.

Ao prof. Dr. João Carlos Cury Saad pela amizade, orientação, incentivo e confiança durante a realização deste estudo.

Aos meus pais, Hilário e Vera, minha irmã Fernanda e meu irmão Uillian, pela força, apoio e motivação, em todos os momentos da minha vida.

A meu grande amor, Luana Ribeiro Borges, por ter estado ao meu lado durante todos os momentos nesta caminhada.

Aos amigos, que estiveram do meu lado nesta trajetória.

## SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS .....	VII
LISTA DE FIGURAS .....	X
LISTA DE SÍMBOLOS .....	XI
<b>RESUMO</b> .....	1
<b>SUMMARY</b> .....	3
<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	5
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	8
<b>2.1 Uso Racional dos Recursos hídricos na Irrigação</b> .....	8
<b>2.2 Irrigação por gotejamento</b> .....	9
<b>2.3 Dimensionamento de linhas laterais para irrigação por gotejamento</b> .....	10
<b>2.4 Perdas de carga nas tubulações</b> .....	14
<b>2.4.1 Perda de carga em tubulações com varias saídas</b> .....	16
<b>2.4.2 Perda de carga localizada no emissor</b> .....	16
<b>2.5 Vazão de entrada na mangueira gotejadora</b> .....	17
<b>2.6 Modelos Matemáticos</b> .....	19
<b>3 MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	20
<b>3.1 Modelo de Programação Não-Linear</b> .....	22
<b>3.2 Modelo de Simulação desenvolvido em Delphi®</b> .....	25
<b>3.3 Procedimento usual de dimensionamento do comprimento da linha lateral</b> .....	31
<b>3.4 Comparações entre os modelos</b> .....	32
<b>4 RESULTADOS</b> .....	33
<b>4.1 Modelo desenvolvido em GAMS®</b> .....	34
<b>4.2 Modelo de Simulação desenvolvido em Delphi®</b> .....	39
<b>4.3 Método usual</b> .....	45

<b>4.4</b>	<b>Comparações entre os modelos</b> .....	47
<b>5</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....	53
<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES</b> .....	55
<b>7</b>	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	56
	ANEXO 1 .....	60
	ANEXO 2 .....	64



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Equações para o coeficiente de fricção “f” para diferentes regimes de escoamento. .....	15
Tabela 2 – Características da mangueira gotejadora da marca MANARI® . .....	21
Tabela 3 - Dados utilizados para a realização dos cálculos.....	21
Tabela 4 - Dados de entrada do modelo computacional desenvolvido em GAMS®.....	24
Tabela 5 – Limites para variáveis utilizadas no modelo GAMS® .....	25
Tabela 6 - Organização dos dados para o cálculo realizado no Delphi® com 20% de variação de pressão. ....	34
Tabela 7 - Pressão de entrada da linha (H ent.), pressão no final da linha (H fim.), espaçamento entre gotejadores (Esp.), número de gotejadores por trecho, comprimento por trecho, comprimento total (L), e vazão de entrada da linha lateral (Q) para as variações de pressão avaliadas. ....	35
Tabela 8 – Ponto de troca dos espaçamentos e perda de carga acumulada até a troca dos espaçamentos. ....	36
Tabela 9 – Uniformidade de distribuição (UD), Uniformidade de emissão (UE), variação de vazão ( $\Delta q$ ), variação de vazão por metro linear ( $\Delta q_l$ ) e comprimento máximo da linha lateral, para as variações de pressão avaliadas utilizando o modelo de PNL.....	36
Tabela 10 – Resumo dos resultados para as opções de dimensionamento, fornecendo a pressão de entrada da linha (H ent.), os espaçamentos entre emissores por trecho, o número de gotejadores por trecho, comprimento por trecho e comprimento total (L), para as variações de pressão calculadas.....	40

Tabela 11- Ponto de troca do espaçamento entre emissores, expresso em % do comprimento total, e perda de carga até esse ponto, expressa como % da perda de carga total, para os $\Delta H$ avaliados no software desenvolvido em Delphi®. ....	41
Tabela 12 - Dados de vazão (Q), uniformidade de distribuição (UD), uniformidade de emissão (UE), variação de vazão por metro linear ( $\Delta q_l$ ), variação de vazão entre emissores ( $\Delta q$ ) e comprimento da linha lateral (L), obtidos para o modelo de simulação desenvolvido no Delphi®. ....	42
Tabela 13 – Dados de pressão (H ent), variação de pressão ( $\Delta H$ ), número de gotejadores, vazão da linha, comprimento da linha (L), uniformidade de distribuição (UD), uniformidade de emissão (UE), variação de vazão por metro linear ( $\Delta q_l$ ), variação da vazão entre gotejadores ( $\Delta q$ ), obtidos para as variações de pressão calculadas. ....	46
Tabela 14 – Porcentagem do comprimento até o emissor de vazão média e perda de carga acumulada até este ponto, para as metodologias e variações de pressão estudadas. ....	48
Tabela 15 – Perda de carga localizada em relação à perda de carga total, para as metodologias e variações de pressão estudadas. ....	49
Tabela 16 - Velocidade média e velocidade de entrada na mangueira gotejadora, para as metodologias e variações de pressão estudadas. ....	49
Tabela 17 – Espaçamentos por trecho, gotejadores por trecho, comprimento por trecho, e comprimento total, para todas as formas de cálculo e variação de pressão de 20%. ....	50
Tabela 18 – Espaçamentos por trecho, gotejadores por trecho, comprimento por trecho, e comprimento total, para todas as formas de cálculo e variação de pressão de 40%. ....	50
Tabela 19 - Dados de número de espaçamentos, vazão (Q), uniformidade de distribuição (UD), uniformidade de emissão (UE), variação de vazão por metro linear ( $\Delta q_l$ ) e variação de vazão entre emissores ( $\Delta q$ ), obtidos para os métodos estudados e $\Delta H$ 20%. ....	51

Tabela 20 - Dados de número de espaçamentos, vazão (Q), uniformidade de distribuição (UD), uniformidade de emissão (UE), variação de vazão por metro linear ( $\Delta q_l$ ) e variação de vazão entre emissores ( $\Delta q$ ), obtidos para os métodos estudados e $\Delta H$ 40%. ....	51
---	----

**LISTA DE FIGURAS**

Figura 1 – Vista em corte da mangueira gotejadora e as dimensões $A_c$ e $A_s$ .....	17
Figura 2 – Dados de saída no modelo GAMS® .....	25
Figura 3 – Tela inicial do software desenvolvido em Delphi® .....	27
Figura 4 – Fluxograma das etapas desenvolvidas pelo modelo em Delphi® .....	29
Figura 5 - Vazão por metro linear, em relação ao comprimento da linha, para 20% de variação de pressão. ....	38
Figura 6 – Vazão por metro linear, em relação ao comprimento da linha, para 40% de variação de pressão. ....	38
Figura 7 - Vazão por metro linear, em relação ao comprimento da linha, para 20% de variação de pressão e espaçamentos calculados.....	43
Figura 8 - Vazão por metro linear, em relação ao comprimento da linha, para 40% de variação de pressão e espaçamentos calculados.....	43
Figura 9 - Vazão por metro linear, em relação ao comprimento da linha, para 20 e 40% de variação de pressão e espaçamento único.....	45
Figura 10 - Vazão por metro linear, em relação ao comprimento da linha, para 20 e 40% de variação de pressão. ....	47

### LISTA DE SÍMBOLOS

$\Delta h_1$ .....	Varição de pressão no trecho 1
$\Delta h_2$ .....	Varição de pressão no trecho 2
$\Delta q_l$ .....	Varição máxima de vazão por metro linear (%)
$A_c$ .....	Área da mangueira gotejadora com o emissor (mm <sup>2</sup> )
$A_s$ .....	Área da mangueira gotejadora sem o emissor (mm <sup>2</sup> )
$C$ .....	Coefficiente de rugosidade do tubo
$C_{vf}$ .....	Coefficiente de variação de fabricação
$D$ .....	Diâmetro da tubulação (m)
$Esp$ .....	Espaçamento entre gotejadores
$f$ .....	Coefficiente de fricção
$F$ .....	Fator de ajuste de Christiansen
$f_2$ .....	Fator de ajuste de Christiansen trecho 2
$f_t$ .....	Fator de ajuste de Christiansen para o comprimento total da linha
$g$ .....	Aceleração da gravidade
$GAMS^{\circledR}$ .....	Sistema Geral de Modelagem Algébrica
$H_{ent}$ .....	Pressão de entrada da linha lateral
$H_{fim}$ .....	Pressão no final da linha lateral
$H$ .....	Pressão no emissor (m.c.a)
$h_f$ .....	Perda de carga na linha lateral (m.c.a)
$h_f^*$ .....	Perda de carga ajustada
$h_{f1}$ .....	Perda de carga no trecho 1 da linha lateral
$h_{f1a}$ .....	Perda de carga ajustada trecho 1
$h_{f2}$ .....	Perda de carga no trecho 2 da linha lateral
$h_{f2a}$ .....	Perda de carga ajustada trecho 2
$h_{fg}$ .....	Perda de carga localizada no emissor
$H_{máx}$ .....	Pressão máxima na linha lateral (mca)
$H_{mín}$ .....	Pressão mínima na linha lateral (mca)
$K$ .....	Fator de proporcionalidade que caracteriza as dimensões do emissor
$L$ .....	Comprimento da linha lateral (m)

m .....	Expoente da vazão na equação de perda de carga
n .....	Número de emissores por planta
N .....	Número de emissores na linha lateral
n1 .....	Número de emissores no trecho 1 da linha lateral
n2 .....	Número de emissores no trecho 2 da linha lateral
nt .....	Número de emissores total da linha lateral
PNL .....	Programação não linear
Q .....	Vazão na linha lateral ( $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ )
q .....	Vazão do emissor ( $\text{L h}^{-1}$ )
Q <sub>1</sub> .....	Vazão no início do trecho 1 ( $\text{L h}^{-1}$ )
q <sub>12</sub> .....	Vazão dos emissores na transição entre os espaçamentos
q <sub>1e</sub> .....	Vazão do emissor no início da linha
Q <sub>2</sub> .....	Vazão no início do trecho 2 ( $\text{L h}^{-1}$ )
q <sub>25%</sub> .....	Média de vazão de 25% dos emissores que operam com as menores vazões
q <sub>2f</sub> .....	Vazão do emissor no final da linha
Q <sub>e</sub> .....	Vazão de entrada na mangueira gotejadora ( $\text{L h}^{-1}$ )
q <sub>e</sub> .....	Vazão do gotejador de entrada ( $\text{L h}^{-1}$ )
q <sub>f</sub> .....	Vazão no final da linha
q <sub>f</sub> .....	Vazão do gotejador final ( $\text{L h}^{-1}$ )
q <sub>l</sub> .....	Vazão por metro linear ( $\text{L h}^{-1} \text{m}^{-1}$ )
q <sub>ld</sub> .....	Vazão desejada por metro linear ( $\text{L h}^{-1} \text{m}^{-1}$ )
q <sub>li</sub> .....	Limite inferior de vazão por metro linear ( $\text{L h}^{-1} \text{m}^{-1}$ )
q <sub>ls</sub> .....	Limite superior de vazão por metro linear ( $\text{L h}^{-1} \text{m}^{-1}$ )
q <sub>máx</sub> .....	Vazão máxima dos emissores ( $\text{L h}^{-1}$ )
q <sub>med</sub> .....	Média das vazões dos emissores ( $\text{L h}^{-1}$ )
q <sub>mim</sub> .....	Vazão mínima dos emissores ( $\text{L h}^{-1}$ )
q <sub>mt1</sub> .....	Vazão média dos emissores no trecho 1
q <sub>mt2</sub> .....	Vazão média dos emissores do trecho 2
q <sub>t</sub> .....	Vazão na transição entre os espaçamentos
Q <sub>t</sub> .....	Vazão total da linha ( $\text{L h}^{-1}$ )

r .....	Razão
$R_e$ .....	Número de Reynolds
$S_e$ .....	Espaçamento entre emissores (m)
$se_1$ .....	Espaçamento entre emissores trecho 1
$Se_{1f}$ .....	Espaçamento calculado utilizando o limite superior de vazão por metro linear (m), para o trecho inicial
$Se_{1i}$ .....	Espaçamento calculado utilizando o limite inferior de vazão por metro linear (m), para o trecho inicial
$se_2$ .....	Espaçamento entre emissores trecho 2
$Se_{2f}$ .....	Espaçamento calculado utilizando o limite superior de vazão por metro linear (m), para o trecho final
$Se_{2i}$ .....	Espaçamento calculado utilizando o limite inferior de vazão por metro linear (m), para o trecho final
$t_1$ .....	Comprimento do trecho 1 (m)
$t_2$ .....	Comprimento do trecho 2 (m)
UD .....	Uniformidade de distribuição
UE .....	Uniformidade de Emissão
V .....	Velocidade na linha ( $m\ s^{-1}$ )
$V_2$ .....	Velocidade do fluxo da água antes do gotejador
$vh_1$ .....	Varição de pressão trecho 1
$vh_2$ .....	Varição de pressão trecho 2
$vml_{11}$ .....	Vazão por metro linear trecho 1
$vml_{12}$ .....	Vazão por metro linear trecho 2
X .....	Expoente de descarga do emissor que caracteriza o regime de fluxo
$\Delta H$ .....	Varição de pressão na linha lateral (%)
$\Delta q$ .....	Varição de vazão na linha lateral (%)

## RESUMO

Autor: RAFAEL LUDWIG

Orientador: JOÃO CARLOS CURY SAAD

O bom desenvolvimento e a produtividade das culturas estão associados à disponibilidade de água em níveis ideais, que pode ocorrer de forma natural pelas chuvas ou por meio de irrigações. Nestes casos, a escolha do sistema de irrigação deve levar em consideração a sua eficiência, destacando-se a irrigação por gotejamento que é realizada diretamente na região radicular, em baixas vazões e alta frequência, mantendo o teor de água no solo em nível adequado. O uso de gotejadores não autocompensantes é significativo em cultivo protegido, áreas com hortaliças e em pomares, desde que o plantio seja em nível, uma vez que seu custo é menor. Entretanto, dada à ausência de mecanismos de autocompensação, as linhas laterais com gotejadores convencionais apresentam menor comprimento, o que implica em maior número de linhas de derivação. Desta forma, é oportuno avaliar procedimentos e técnicas que possam definir o comprimento máximo da linha lateral sem prejudicar a uniformidade de distribuição de água. Acredita-se que a utilização de dois espaçamentos em trechos distintos, e não um único como normalmente é realizado, seria uma



alternativa para a obtenção de maiores comprimentos de linha lateral e, conseqüentemente, a redução nos custos de implantação. Isto também é alcançado com a utilização de maiores variações de vazão, podendo-se empregar um  $\Delta q$  de 30% que mesmo assim a uniformidade de emissão permanece acima de 80%, conforme preconizado por Wu (1997). As questões fundamentais são: a definição dos dois espaçamentos e a determinação do local de troca de espaçamento. Assim, foram desenvolvidos dois modelos matemáticos, um com programação não linear e outro de simulação elaborado com a linguagem de programação *Pascal*. Os resultados levaram ao entendimento de que a utilização da maior variação de vazão, desde que dentro de padrões aceitáveis de uniformidade, garantiu melhores resultados. Também se verificou que a adoção de espaçamento duplo aumentou o comprimento da linha lateral e também ofereceu uma menor variação de vazão por metro linear. No que diz respeito aos modelos desenvolvidos verificou-se que o modelo de Programação Não Linear (PNL) apresentou a melhor configuração da linha lateral. O software DiLLIG - Dimensionamento da linha lateral para irrigação por gotejamento desenvolvido no Delphi<sup>®</sup>, demonstrou-se de fácil manipulação, apresentando resultados confiáveis, porém inferiores ao obtido pelo modelo de PNL. O método usual, utilizado como referência de comparação, apresentou o menor comprimento de linha lateral, visto que subdimensionou a linha lateral ao não utilizar toda a variação de pressão admissível. Considerando isso, recomenda-se a utilização do modelo desenvolvido no GAMS<sup>®</sup>.

---

Palavras chaves: Uniformidade de emissão; Irrigação localizada; Espaçamento entre emissores.

## DESIGN LATERAL LINE USING TWO SPACING BETWEEN DRIPPERS.

Botucatu, 2012. 59p. Dissertação (Mestrado em Agronomia - Irrigação e Drenagem) – Faculdade de Ciências Agronômicas – Universidade Estadual Paulista.

Author: RAFAEL LUDWIG

Adviser: Dr. JOÃO CARLOS CURY SAAD

### SUMMARY

The crop development and productivity are associated with the water supply at optimal levels, which can occur naturally by rain fed or irrigation. In these cases, the choice of the irrigation system must consider the efficiency, which is especially drip irrigation which is carried out directly in the root region, with low flow and high frequency while maintaining water content in the soil at the appropriate level. The use of no pressure compensating emitters is significant in greenhouse cultivation and fruit orchard with trees planted on level, since its cost is low. Though, given the absence of pressure compensation mechanisms, the lateral lines are shorter, which implies in a greater number of manifold lines. Thus, it is appropriate to evaluate procedures and techniques that can increase the lateral line length without affecting the water distribution uniformity. It is believed that the use of two spacing in lateral line different sections, not one, as usually is done, would be an alternative to achieving greater lateral line lengths and hence reduction in initial costs. This can also be achieved with the use of higher flow variations, by applying a pressure variation of 30% and maintaining the emission uniformity over 80%, as proposed by Wu (1997). The fundamental questions are: defining the two spacing values and to find the ideal location for the exchange. Two mathematical models were developed, one with non-linear programming and another with simulation built in Pascal language. The results led to the understanding that the use of

higher flow variation guarantees better results, provided that the uniformity standards were respected. The adoption of two spacing increased the lateral line length offering a smaller range of flow per meter. Evaluating the two developed models it was possible to conclude that the nonlinear programming (NLP) presented the best configuration of the lateral line. The software DiLLIG – Lateral line design for drip irrigation developed in *Delphi*<sup>®</sup> was easily to handle and had reliable results, but not as good as the results obtained by the NLP model. The traditional method, used as a reference for comparison, had the shortest lateral line length, since it did not use the entire range of the allowed pressure. As a result, we recommend the NLP model developed in *GAMS*<sup>®</sup>.

---

Keywords: Emission uniformity; Trickle irrigation; Spacing between emitters.

## 1 INTRODUÇÃO

Para que as plantas possam expressar seu máximo potencial produtivo é necessário que o teor de água no solo esteja em níveis adequados. A obtenção deste ponto ideal, em regiões com déficit hídrico, pode ser alcançada com o uso de sistemas de irrigação, os quais estão divididos, de acordo com Mantovani *et al.* (2009), em irrigação por superfície, irrigação por aspersão e irrigação localizada. Estes são responsáveis pela distribuição da água na quantidade e frequência adequadas, de modo a garantir o perfeito desenvolvimento e produção das culturas (VIEIRA, 1989).

Sabe-se, ainda, da necessidade de racionalização do consumo dos recursos hídricos, o que torna necessário a utilização de métodos mais eficientes, no sentido de uso consciente e criterioso deste insumo. Neste caso, indica-se a irrigação localizada, por ser um dos meios mais eficazes de aplicação de água para as plantas, em destaque a irrigação por gotejamento. A principal vantagem desta técnica está no fato de que a irrigação é realizada diretamente na região radicular, em baixas vazões e alta frequência, mantendo o teor de água em nível ideal.

Para implantação deste sistema, usualmente adota-se como critério para obtenção do máximo comprimento da linha lateral, a variação máxima de vazão entre os gotejadores de 10%, o que implica em, aproximadamente, uma variação equivalente de 20% na pressão ao longo da linha quando se utiliza gotejadores não autocompensantes.

A obtenção de extensões maiores da linha lateral é oportuna em sistemas de irrigação localizada que utilizam gotejadores convencionais, pois proporciona

redução de custo, mas para isto deve-se atentar para a uniformidade de aplicação da água (ANDRADE, 2009). A utilização de maiores variações de vazão ( $\Delta q$ ) pode proporcionar maiores comprimentos de linha lateral, sendo que Wu (1997) propõe o emprego de um  $\Delta q$  de 30% e afirma ainda que com esse valor é possível obter uma uniformidade de distribuição acima de 80%.

O dimensionamento usual é realizado pela combinação de equações, dentre elas a que estima a perda de carga na tubulação, tendo como variável justamente o comprimento da linha lateral.

Andrade (2009) levantou a hipótese de que a utilização de dois espaçamentos entre os emissores, e não um único, como normalmente é realizado, seria uma alternativa para a obtenção de maiores comprimentos de linha lateral. Essa hipótese foi verificada em seu trabalho sobre uniformidade de emissão de água utilizando diferentes espaçamentos entre gotejadores na linha lateral. Entretanto, para a utilização de dois espaçamentos distintos é necessário definir dois pontos fundamentais para o dimensionamento do sistema: quais os espaçamentos entre gotejadores mais adequados e qual o comprimento de cada trecho com espaçamentos distintos. Este autor adotou o ponto de mudança dos espaçamentos como sendo 40% do comprimento total da linha, o que não implica necessariamente na melhor solução.

É muito oportuno avaliar a possibilidade de aumentar o comprimento da linha lateral de um sistema de irrigação com gotejadores convencionais com o uso de dois trechos com espaçamentos distintos, definindo qual a melhor localização do ponto de troca de espaçamento e analisando diferentes variações de pressão, mantendo a uniformidade da irrigação em valores aceitáveis. Para tanto, pode-se desenvolver modelos matemáticos tanto de simulação como de otimização, com base em técnicas de Pesquisa Operacional, como é o caso da Programação Não-Linear.

O problema de pesquisa que esta dissertação procurou responder foi: é possível aumentar o comprimento da linha lateral de um sistema de irrigação com gotejadores não autocompensantes com o uso de trechos com espaçamentos distintos entre emissores, mantendo a uniformidade da irrigação em níveis adequados?

O objetivo geral desta dissertação foi avaliar a possibilidade de aumentar o comprimento da linha lateral de um sistema de irrigação por gotejamento com o

uso de dois espaçamentos entre emissores em trechos distintos, mantendo a uniformidade da irrigação em níveis recomendados.

Os objetivos específicos foram: a) comparar o desempenho de diferentes métodos matemáticos. b) verificar a influência da variação de vazão no dimensionamento de linhas laterais de sistemas de irrigação por gotejamento, com uso de dois espaçamentos distintos entre emissores de forma a permitir a maximização de seu comprimento, mantendo a uniformidade da irrigação.

## **2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1 Uso Racional dos Recursos hídricos na Irrigação**

A terra é um planeta de água, sendo que 75% da sua superfície é coberta por esse líquido, indispensável à sobrevivência (ANA, 2011). No entanto, segundo Shiklomanov (1998), apenas 2,5% é água doce. A água está distribuída, de acordo com a ANA (2011), entre aquíferos (97,87%), chuvas (1,17%) e lagos, represas e rios com apenas 0,96%, onde estão mais acessíveis para o uso.

No Brasil apesar da maior concentração de água doce disponível encontrar-se na bacia amazônica, representando 75%, o maior consumo está nas regiões sul/sudeste/nordeste que representam 89% do nacional. No entanto, estas regiões somadas possuem apenas 10% da água disponível (BASTOS, 2009).

A demanda hídrica no Brasil (vazão retirada) é de aproximadamente  $1.500 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ , sendo que 47% desse retornam as bacias hidrográficas. Do total de água captado perto de 46% é destinado à irrigação (ANA, 2007). Já com relação à água efetivamente utilizada a irrigação é responsável por 70% (ANA, 2007; FAO, 2007).

A utilização indiscriminada da água no Brasil começou a ser vista sob uma nova ótica a partir do surgimento da Lei 9.433 de 8 de janeiro de 1997, a Lei das Águas, que reconhece a água como um bem de domínio público, sendo um recurso natural limitado e dotado de valor econômico. Dispõe ainda essa lei, que em situações de escassez, o uso

prioritário dos recursos hídricos é o consumo humano e a dessedentação de animais (BRASIL, 2004).

Apesar do uso racional da água estar em pauta, é evidente que no processo de captação/uso há muito desperdício. Tal concepção é evidenciada por Coelho *et al.* (2005) ao destacarem a baixa eficiência mundial dos sistemas de irrigação que se encontra em torno de 37%. Informam ainda, que a simples melhora de 1% na eficiência nos países em desenvolvimento de clima semiárido ou árido acarretaria em uma economia de 200 mil litros de água por hectare ano<sup>-1</sup>.

Considerando isso, é importante lembrar que existem diversas técnicas utilizadas para garantir os recursos hídricos necessários para o bom desenvolvimento das culturas. Desde a irrigação por inundação (por superfície) que tem por característica a cobertura total da área, técnica muito utilizada na região Sul do Brasil para produção de arroz, até a irrigação localizada por gotejamento, que propõe o uso do recurso hídrico de forma controlada, muito utilizada em culturas perenes, fruticultura e horticultura.

Os sistemas de irrigação por superfície, mais especificamente o por inundação, tem como vantagem o baixo custo inicial da produção, mas em contrapartida, tem alta demanda de mão-de-obra, devido à impossibilidade de mecanização para a manutenção do sistema.

Já o sistema de irrigação por gotejamento, apesar das vantagens que oferece, tem como principal limitação o alto custo de implantação do sistema. Foi pensando nisso, que este trabalho trará um aprofundamento sobre a utilização desta técnica, no intuito de encontrar alternativas para aumentar o comprimento da linha lateral, o que conforme Andrade (2009), promove redução de custos na instalação do projeto, o que pode ampliar a difusão desta técnica.

## **2.2 Irrigação por gotejamento**

Na irrigação por gotejamento a água é aplicada diretamente na região do sistema radicular, em quantidade adequadas e com elevada eficiência, mas possui como desvantagem a possibilidade de entupimento dos emissores, em caso de manutenção inadequadas (MANTOVANI *et al.*, 2009). É caracterizada pelo fornecimento de forma



frequente e lenta de água no solo através de dispositivos chamados emissores, localizados em pontos selecionados ao longo das linhas de distribuição de água (HOWELL *et al.*, 1983). O espaçamento entre emissores na linha lateral e entre as laterais dependem da descarga do emissor, do tipo de solo e da cultura. Já o tamanho e a forma do bulbo molhado dependem da descarga do gotejador, da duração da aplicação e do tipo de solo (BENAMI e OFEN, 1984).

Essa técnica de irrigação utiliza tubulações flexíveis de polietileno, nas quais são inseridos os emissores (linhas laterais), que operaram com pressões entre 5 a 25 m.c.a, fornecendo vazões de 1 a 20 L h<sup>-1</sup>, gota a gota, podendo formar no solo uma superfície molhada de forma circular, não havendo sobreposição dos bulbos molhados, ou uma forma continua com sobreposição (BERNARDO *et al.*, 2006). Este último é empregado em cultivos adensados, como as hortaliças (ANDRADE, 2009), nos quais o espaçamento entre plantas é menor que o bulbo molhado, o que faz com que apenas um gotejador atenda mais de uma planta.

Os emissores podem ser do tipo autocompensantes e não autocompensantes. Os primeiros se ajustam as variações de pressão fornecendo assim uma vazão constante ao longo da linha lateral, possibilitando o emprego de maiores comprimentos de linha, em contrapartida o seu emprego tem custo mais elevado. Por outro lado, nos emissores não autocompensantes a vazão diminui à medida que há uma redução da pressão, fazendo com que as linhas sejam menores para manutenção da uniformidade.

A escolha das características e da disposição desses componentes está incluída no dimensionamento de um sistema de irrigação por gotejamento. Para melhor compreensão dessas interinfluências os itens que seguem abordarão detalhadamente as variáveis de análise desta pesquisa, que são as linhas laterais e os emissores. As demais características serão consideradas aqui, para fins de estudo, como ideais e idênticas entre as comparações.

### **2.3 Dimensionamento de linhas laterais para irrigação por gotejamento**

Para o dimensionamento de um sistema de irrigação por gotejamento devem ser levados em consideração cinco aspectos principais: a necessidade de

complementação hídrica; a configuração da rede hidráulica; o custo de instalação; a eficiência da irrigação e o tipo de gotejador utilizado.

Com relação ao tipo de gotejador, deve-se considerar se é autocompensante ou não (convencionais). Os gotejadores convencionais são muito utilizados em cultivo protegido, na irrigação de hortaliças e na fruticultura, desde que o plantio seja em nível.

Por não ser dotado de mecanismo de auto compensação, os gotejadores convencionais resultam em linhas laterais de menor comprimento, gerando maior custo com linhas de derivação. Portanto, é um tema oportuno e relevante estudar procedimentos e critérios que permitam obter linhas laterais mais longas quando se utiliza gotejadores não autocompensantes.

Andrade (2009) considerou ser possível ampliar o comprimento da linha lateral com o uso de dois espaçamentos entre emissores em trechos distintos da mesma. A utilização de linhas laterais mais longas promove redução de custos na instalação do projeto, entretanto pode reduzir a uniformidade de emissão de água, sendo que a otimização deste fator é importante objetivo de todo projeto criteriosamente executado. Propôs-se um modelo de mangueira gotejadora com dois segmentos, sendo o ultimo com um espaçamento padrão, e o segmento inicial com um espaçamento especial entre os emissores, com o objetivo de obter linhas mais longas sem prejudicar a Uniformidade de Emissão (UE) de água. Desta forma, a mangueira gotejadora dimensionada conforme o modelo proposto apresentou comprimento total de 150,6 m, sendo 59,7 m iniciais com espaçamento entre emissores de 0,35 m associada com 90,9 m finais com distancia entre gotejadores de 0,30 m. Esta combinação de espaçamentos entre emissores apresentou variação de vazão de 8,05 % e UE de 97,62% e foi 36% mais longa que a mangueira gotejadora com único espaçamento de 0,30 m, com variação de vazão de 10 %, e UE de 94,71%.

No entanto, Andrade (2009) assumiu que o melhor ponto da linha lateral para realizar a troca do espaçamento entre gotejadores seria a 40% do inicio da linha, sem que houvesse uma investigação se essa é realmente a configuração que maximizaria o comprimento da linha lateral. Este valor que representa o comprimento da linha até o ponto de vazão média é indicado por Talens (2002) e Keller e Bliesner (1990).

Para uma adequada uniformidade de aplicação de água normalmente emprega-se no dimensionamento uma variação de vazão e pressão de 10 e 20%, respectivamente, os quais proporcionam um coeficiente de uniformidade distribuição aproximados a 98% e 95% (WU, 1997; TALENS, 2002). Wu (1997), indica a utilização da variação de vazão de até 30% que ainda assim se obterá um coeficiente de uniformidade superior a 80%. Considerando isso, optou-se por adotar neste estudo a máxima variação de vazão admissível de 30%.

As variações de vazão e pressão na linha lateral podem ser determinadas utilizando-se as equações 1 e 2, respectivamente (WU *et al.*, 1983; BARRETO FILHO *et al.*, 2000).

$$\Delta q = \frac{q_{máx} - q_{mín}}{q_{máx}} 100 \quad (1)$$

$$\Delta H = \frac{H_{máx} - H_{mín}}{H_{máx}} 100 \quad (2)$$

em que:

$\Delta q$ = variação de vazão (%);

$q_{máx}$  = vazão máxima (L h<sup>-1</sup>);

$q_{mín}$ = vazão mínima (L h<sup>-1</sup>);

$\Delta H$ = variação de pressão (%);

$H_{máx}$ = pressão máxima (mca);

$H_{mín}$ = pressão mínima (mca).

De acordo com Wu e Yue (1993), a variação de vazão pode ser relacionada com a variação de pressão pela equação 3.

$$\Delta Q = \left[ 1 - \left( 1 - \frac{\Delta H}{100} \right)^x \right] 100 \quad (3)$$

em que:

$\Delta Q$ = variação de vazão na subunidade (%);

$\Delta H$ = variação de pressão (%);

$x$ = expoente de descarga do emissor.

A uniformidade de distribuição (UD) é uma informação importante para se avaliar os sistemas de irrigação localizada, tanto no projeto, quanto na operação em campo (FAVETTA e BOTREL, 2001). Basicamente, a UD é a razão entre a média dos 25% menores valores de vazão dos emissores e a vazão média geral, expressa em percentagem podendo ser obtida pela equação 4 (CLEMMENS e SOLOMON, 1997; STYLES *et al.*, 2008)

$$UD = 100 \frac{q_{25\%}}{q_{med}} \quad (4)$$

em que:

$q_{25\%}$ = média de vazão de 25% dos emissores que operam com as menores vazões;

$q_{med}$ = média das vazões dos emissores.

Também pode ser utilizado, para avaliar o sistema de irrigação localizada a equação 5, a qual determina a uniformidade de emissão (UE) no projeto do sistema de gotejamento de irrigação (BRALTS, 1986). A UE é resultante do conjunto de características do equipamento e de suas configurações hidráulicas (SAAD e MARCUSSI, 2006).

$$UE = 100 \left[ 1 - \frac{1,27 C_{vf}}{\sqrt{n}} \right] \frac{q_{min}}{q_{med}} \quad (5)$$

em que:

$C_{vf}$ = coeficiente de variação de fabricação;

$q_{min}$ = vazão mínima dos emissores ( $L h^{-1}$ );

$q_{med}$ = média das vazões dos emissores ( $L h^{-1}$ );

$n$ = número de emissores por planta;

## 2.4 Perdas de carga nas tubulações

Quando a água flui nas tubulações há - devido ao atrito interno com as paredes - perda de energia e pressão, conhecida como perda de carga. Esta atinge valores próximos a 73% do total, em aproximadamente 38% do início da linha lateral (KELLER e BLIESNER, 1990). No entanto, o mesmo autor corroborado por Talens (2002) afirmam que usualmente adota-se 40% do comprimento e 75% de perda de carga, para fins de conveniência de cálculos e efeitos práticos, valores considerados por Andrade (2009), em seu trabalho, para realizar a troca de espaçamentos. A determinação dessa perda de carga na linha lateral pode ser obtida através da equação empírica de Hazen-Williams (Equação 6).

$$hf = 10,646 \left( \frac{Q}{C} \right)^{1,85} \frac{L}{D^{4,87}} \quad (6)$$

em que:

hf= Perda de carga na linha (mca);

Q= Vazão na linha ( $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ );

C= Coeficiente de rugosidade;

L= Comprimento da linha (m);

D= Diâmetro da tubulação (m).

O coeficiente de rugosidade varia de 80 para tubo extremamente rugoso a aproximadamente 150 para tubo liso (ALLEN, 1996). Bernardo *et al.* (2006) considera o valor do coeficiente de rugosidade para o plástico variando de 140 a 145. Nesse estudo adotou-se o coeficiente de rugosidade igual a 140.

Ainda, a perda de carga, pode ser obtida pela equação de Darcy-Weisbach (Equações 7 e 8).

$$hf = \frac{f L V^2}{D 2 g} \quad (7)$$

$$hf = \frac{8 f L Q^2}{\pi^2 D^5 g} \quad (8)$$

Considerando que a velocidade da água na tubulação é obtida pela equação 9.

$$V = \frac{4 Q}{\pi D^2} \quad (9)$$

em que:

hf= Perda de carga na linha (mca);

f= Coeficiente de fricção;

L= Comprimento da linha (m);

V= velocidade na linha (m s<sup>-1</sup>);

D= Diâmetro da tubulação (m);

g= Aceleração da gravidade

Q= Vazão na linha (m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>);

O coeficiente de fricção é dependente do número de Reynolds (Equação 10), que pode ser obtido a partir das equações da Tabela 1.

$$R_e = 1,26 \times 10^6 \frac{Q}{D} \quad (10)$$

em que:

R<sub>e</sub>= Número de Reynolds;

Tabela 1 – Equações para o coeficiente de fricção “f” para diferentes regimes de escoamento.

Regime de fluxo	Número de Reynolds	Equação para “f”	
Laminar	$Re \leq 2.000$	$f = \frac{64}{R_e}$	(11)
Fluxo turbulento	$2.000 < Re \leq 10^5$	$f = 0,3164 Re^{-0,25}$	(12)
Totalmente turbulento	$10^5 < Re < 10^7$	$f = 0,130 Re^{-0,172}$	(13)

FONTE: Adaptado de Hathoot *et al.* (1993); Kang e Nishiyama (1995).

### 2.4.1 Perda de carga em tubulações com várias saídas

Nas tubulações com várias saídas, a perda de carga total é igual à soma das perdas em todos os pontos (DEMIR *et al.*, 2007). Assim, para dimensionamentos realizados com equação 6 ou 7, deve-se corrigir o valor da perda de carga pelo fator de ajuste de Christiansen pela equação 14. A última é utilizada para o cálculo da perda de carga ajustada como pode ser visualizado na equação 15.

$$F = \frac{1}{m+1} + \frac{1}{2N} + \frac{\sqrt{m-1}}{6N^2} \quad (14)$$

em que:

F= Fator de ajuste de Christiansen;

m= Expoente da vazão na equação de perda de carga;

N= Número de emissores na linha lateral.

$$hf' = hf F \quad (15)$$

em que:

hf'= perda de carga ajustada;

### 2.4.2 Perda de carga localizada no emissor

Os gotejadores integrados internamente na mangueira reduzem a seção de escoamento, ocasionando uma obstrução ao fluxo de água, levando a uma perda de carga localizada (ANDRADE, 2009; RETTORE NETO *et al.*, 2009). A determinação desta perda de carga pode ser realizada pela equação 16 (ALVES e PORTO, 2002 apud ANDRADE, 2009).

$$hf_g = \frac{(1-r)^2}{r^2} \frac{V_2^2}{2g} \quad (16)$$

em que:

hf<sub>g</sub>= perda de carga localizada no emissor;

r= razão obtida pela equação 17;

V<sub>2</sub>= velocidade do fluxo da água antes do gotejador;

g= aceleração da gravidade;

$$r = \frac{Ac}{As} \quad (17)$$

em que:

$Ac$ = área da mangueira gotejadora com o emissor ( $\text{mm}^2$ );

$As$ = área da mangueira gotejadora sem o emissor ( $\text{mm}^2$ );

As dimensões  $Ac$  e  $As$  podem ser melhor entendidas na Figura 1.

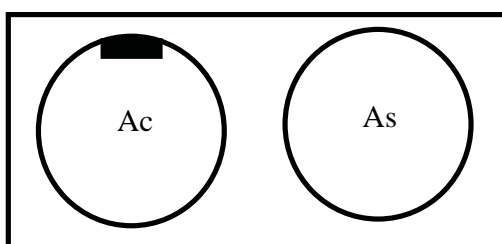


Figura 1 – Vista em corte da mangueira gotejadora e as dimensões  $Ac$  e  $As$ .

FONTE: Adaptado de Andrade (2009).

## 2.5 Vazão de entrada na mangueira gotejadora

A vazão de entrada na mangueira gotejadora é dada pela razão entre a vazão do emissor e o número de emissores na linha (Equações 18 e 20).

$$Q_e = q N \quad (18)$$

$$N = \frac{L}{S_e} \quad (19)$$

$$Q_e = \frac{q L}{S_e} \quad (20)$$

em que:

$Q_e$ = vazão de entrada na mangueira gotejadora ( $\text{L h}^{-1}$ );

$q$ = vazão do emissor ( $\text{L h}^{-1}$ );

$L$ =comprimento da linha lateral (m);

$S_e$ = espaçamento entre emissores (m);

$N$ = número de emissores na linha lateral, que pode ser obtido pela equação 19.



A vazão do emissor não autocompensante pode ser caracterizada empiricamente em função da pressão de operação, conforme a equação 21 (HOWELL e HILER, 1974; KELLER e KARMELI, 1974; HARRY e AMIN, 1981; HOWELL *et al.*, 1983; WU, 1992; YILDIRIM, 2007). A vazão por metro linear pode ser obtida pelas equações 22 e 23.

$$q = K H^x \quad (21)$$

em que:

q= vazão do emissor (L h<sup>-1</sup>);

K= fator de proporcionalidade que caracteriza as dimensões do emissor;

H= pressão no emissor (mca);

X= expoente de descarga do emissor que caracteriza o regime de fluxo.

O expoente X é determinado pelo número de Reynolds, para emissores com fluxo turbulento recomenda-se X= 0,5, já para fluxo laminar indica-se X= 0,7 a 0,8 (BENAMI e OFEN, 1984).

$$ql = \frac{K H^x}{Se} \quad (22)$$

$$ql = \frac{q N}{L} \quad (23)$$

em que:

ql= vazão por metro linear (L h<sup>-1</sup> m<sup>-1</sup>);

Após esse aprofundamento acerca das características e disposição dos componentes de um sistema de irrigação por gotejamento, e das variáveis envolvidas no dimensionamento das linhas laterais, se dará início a reconstrução do caminho metodológico deste estudo.

E através do detalhamento das escolhas efetuadas em busca da redução de custos para implantação desse sistema, propõe-se um passo a passo que acompanhe essa etapa de investigação das possibilidades de aumento do comprimento da linha lateral, seja com

o uso de espaçamento duplo entre os emissores e/ou mudança nos valores de referência (Variação de pressão).

## 2.6 Modelos Matemáticos

A simulação é uma alternativa para a resolução de problemas envolvendo múltiplas alternativas, ainda mais com as facilidades computacionais existentes. Dentre os softwares que podem ser empregados destaca-se o Delphi<sup>®</sup>, no qual a programação é orientada a objetos. Este utiliza a simulação para resolução de problemas, obtendo uma solução, a qual pode não ser ótima, ou seja, pode-se encontrar uma solução viável dentro das diversas possibilidades, no entanto esta solução apontada pode não ser a melhor entre todas as possíveis.

Para solucionar modelos determinísticos e maximizar o comprimento da linha lateral, pode-se optar pelo emprego da programação não linear, a qual é capaz de resolver problemas abstratos, buscando a solução ótima dentro de um universo de possibilidades. É muito utilizada na tomada de decisões e definição quanto à obtenção de produtos melhores e mais econômicos. Útil tanto na indústria quanto na pesquisa, o emprego desta metodologia visa transformar conceitos e conhecimentos em equações matemáticas e assim implementá-las por meio de processos lógicos, simulando situações reais (RONDÓN *et al.*, 2002).

Diversos softwares estão disponíveis para este fim. Dentre eles destaca-se o GAMS<sup>®</sup>, desenvolvido visando fornecer uma linguagem de alto nível para uma representação compacta de modelos grandes e complexos, permitindo mudanças de forma simples e segura (BROOKE *et al.*, 1997). Essas características levaram a escolha deste software para a realização deste trabalho.

### 3 MATERIAL E MÉTODOS

Para o atendimento dos objetivos propostos foram desenvolvidos dois modelos matemáticos para comparação com a metodologia usual de definição do comprimento máximo da linha lateral de gotejadores não autocompensantes. O primeiro modelo foi desenvolvido utilizando a Programação Não-Linear e o segundo a técnica da simulação por meio de algoritmo desenvolvido na linguagem de programação *Pascal*. A metodologia usual, com a qual os modelos desenvolvidos foram comparados, fundamenta-se na equação de perda de carga de Darcy-Weisbach.

Para a realização da comparação adotou-se a mangueira gotejadora da marca MANARI<sup>®</sup> da empresa Petroisa Irrigação, a qual utiliza emissores não autocompensantes, e tem suas características apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2 – Características da mangueira gotejadora da marca MANARI®.

<b>Parâmetro</b>	<b>Valores</b>
Pressão nominal de trabalho (m.c.a.)	10
Pressão mínima de operação (m.c.a.)	6
Diâmetro da tubulação (mm)	16
Coefficiente da relação vazão pressão (K)	0,46297
Expoente de descarga do emissor que caracteriza o regime de fluxo (x)	0,503
Área da mangueira gotejadora com o emissor (mm <sup>2</sup> )	188,73
Coefficiente de variação de fabricação (C <sub>vf</sub> )	0,0353

FONTE: Adaptado de Andrade (2009).

Além dos dados característicos da mangueira gotejadora, adotaram-se também os dados contidos na Tabela 3 para a realização dos cálculos.

Tabela 3 - Dados utilizados para a realização dos cálculos.

<b>Dados</b>	<b>Delphi®</b>	<b>GAMS®</b>	<b>Usual</b>
Vazão desejada por metro linear (L.h <sup>-1</sup> )	3,5	-	-
Varição de vazão por metro linear máxima (%)	20	-	-
Uniformidade de distribuição mínima (%)	80	-	-
Coefficiente de rugosidade do tubo para a equação de Hazen-Williams	140	140	-
Espaçamento entre gotejadores (quando utilizado espaçamento único) (m)	0,4	-	0,4
Fator de ajuste de Christiansen	-	-	0,35

Optou-se por realizar os cálculos, nos três métodos, abrangendo a faixa de operação do emissor, para isso experimentou-se as variações de pressão de 10%; 15%; 20%; 25%; 30%; 35%; e 40%. Para melhor compreensão esse processo será abordado detalhadamente nos itens que seguem.

### 3.1 Modelo de Programação Não-Linear

Na construção do modelo de programação não linear (PNL) considerou-se: facilidade de aplicação das equações; exatidão dos resultados; e praticidade na utilização do programa. Para isto, adotaram-se as equações: do fator de ajuste de Christiansen (equação 14); da perda de carga ajustada (equação 15); da perda de carga de Hazen-Williams (equação 6); da vazão do emissor (equação 21); do número de emissores na linha lateral (equação 19); e da vazão por metro linear (equação 23).

O modelo desenvolvido é do tipo maximização, no qual a função objetivo (equação 24) visa definir o maior comprimento da linha lateral que atenda as restrições estabelecidas.

$$\text{Máx...}L = t_1 + t_2 \quad (24)$$

em que:

$t_1$ = comprimento do trecho inicial (m);

$t_2$ = comprimento do trecho final (m);

Para cada trecho o modelo estabelece uma variação de pressão ( $\Delta h_1$  e  $\Delta h_2$ ), sendo que a soma delas deve ser igual ao  $\Delta h$  informado nos dados de entrada (equação 25). Utilizando as equações 26 e 27 é possível obter as perdas de carga admissíveis em cada trecho, cujos valores são utilizados como referencia para a obtenção dos comprimentos de cada trecho, por meio das equações 28 e 29.

$$\Delta h = \Delta h_1 + \Delta h_2 \quad (25)$$

$$hf_1 = H \Delta h_1 \quad (26)$$

$$hf_2 = H \Delta h_2 \quad (27)$$

$$hf_1 = \left( \frac{10,646 Q_t^{1,85} C^{1,85} (t_1 + t_2)}{D^{4,87} F_t} \right) - \left( \frac{10,646 Q_2^{1,85} t_2 f_2}{C^{1,85} D^{4,87}} \right) \quad (28)$$

$$hf_2 = \left( \frac{10,646 Q_2^{1,85} t_2 f_2}{C^{1,85} D^{4,87}} \right) \quad (29)$$

Em que:

$\Delta h_1$ =variação de pressão no trecho 1;

$\Delta h_2$ =variação de pressão no trecho 2;

$Q_t$ = vazão total da linha ( $L h^{-1}$ );

$Q_2$ = vazão do trecho 2 ( $L h^{-1}$ );

$t_1$ = comprimento do trecho 1 (m);

$t_2$ = comprimento do trecho 2 (m);

$F_t$ = ajuste de Christiansen para o comprimento total da linha;

$F_2$ = ajuste de Christiansen para o segundo trecho;

Para o primeiro trecho a perda de carga considera o comprimento total ( $t_1+t_2$ ) e o fator de ajuste de Christiansen com o total de emissores ( $N_t$ ) descontando a perda de carga do segundo trecho (equações 28). Simultaneamente, o modelo calcula a vazão total em cada trecho, pela equação 30.

$$Q_2 = Q_t - Q_1 \quad (30)$$

O modelo define o número de gotejadores pela equação 19, e também, verifica vazão média dos emissores em cada trecho pelo calculo da vazão em três pontos distintos (equação 21), considerando a pressão em cada ponto. O primeiro é na entrada da linha lateral ( $q_e$ ), o segundo ponto é na transição entre os espaçamentos ( $q_i$ ) e o terceiro é no final da linha ( $q_f$ ). A média de cada trecho é dada pelas equações 31 e 32.

$$q_{mt1} = \frac{q_e + q_t}{2} \quad (31)$$

$$q_{mt2} = \frac{q_t + q_f}{2} \quad (32)$$

em que:

$q_{mt1}$  = vazão média dos emissores do trecho inicial;

$q_{mt2}$  = vazão média dos emissores do trecho final;

A obtenção da vazão média em cada trecho permite encontrar a vazão por metro linear utilizando a equação 23.

Para que o modelo realize os cálculos devem ser fornecidos os seguintes dados de entrada: diâmetro (D); coeficiente de rugosidade (C); variação de pressão ( $\Delta h$ ); pressão de entrada (H); fator de proporcionalidade que caracteriza as dimensões do emissor (K); e o expoente de descarga do emissor que caracteriza o regime de fluxo (x), como pode ser visto na Tabela 4.

Tabela 4 - Dados de entrada do modelo computacional desenvolvido em GAMS<sup>®</sup>.

<b>Parâmetro</b>	<b>Valor</b>
Diâmetro (mm)	16
Coeficiente de rugosidade (C)	140
Variação de pressão (%)	10; 15; 20; 25; 30; 35; 40
Pressão de entrada (m.c.a.)	10
Fator de proporcionalidade que caracteriza as dimensões do emissor (K)	0,46297
Expoente de descarga do emissor que caracteriza o regime de fluxo (X)	0,503

O modelo de PNL foi desenvolvido na linguagem GAMS<sup>®</sup> e como se trata de equações não lineares há necessidade da definição da faixa de variação permitida de algumas variáveis para que se evite a divisão por zero durante os cálculos e para que os resultados obtidos sejam coerentes com os valores factíveis (Tabela 5).

Tabela 5 – Limites para variáveis utilizadas no modelo GAMS®.

Variável (por trecho)	Limite inferior	Limite superior
Vazão ( $\text{m}^3.\text{s}^{-1}$ )	$2,78 \times 10^{-07}$	$2,78 \times 10^{-04}$
Comprimento (m)	1	1000
Fator de ajuste de Christiansen	0,01	1
Número de gotejadores	1	10000
Espaçamento entre gotejadores	0,1	1
Vazão por metro linear ( $\text{m}^3.\text{s}^{-1}$ )	$8,33 \times 10^{-07}$	$1,39 \times 10^{-06}$

O modelo fornece diversos dados de saída, em busca da otimização da função objetivo, que são: comprimento da linha (L); comprimento dos trechos (t1 e t2); Vazão por trecho (Q1, Q2); vazão total da linha (Qt); número de emissores (n1, n2, nt); espaçamento entre emissores (se1, se2); vazão por metro linear (vml11, vml12); perda de carga (hf1, hf2, hf1a, hf2a); variação de pressão (vh1, vh2); fator de ajuste de Christiansen (f2, ft); vazão dos emissores (q1e, q12, q2f); vazão media dos emissores (qmt1, qmt2), como pode ser observado na Figura 2.

```
variables
L, T1, T2, Q1, Q2, QT, N1, N2, NT, SE1, SE2, VML11, VML12, HF1, HF1A, HF2, HF2A
VH1, VH2, F2, FT, Q1E, Q12, Q2F, QMT1, QMT2;
```

Figura 2 – Dados de saída no modelo GAMS®.

### 3.2 Modelo de Simulação desenvolvido em Delphi®

O software computacional DiLLIG – Dimensionamento da linha lateral para irrigação por gotejamento, elaborado no Delphi®, foi desenvolvido de forma que possibilitasse o dimensionamento da linha, a partir do último gotejador, calculando emissor a emissor até o primeiro, e atendendo a dois requisitos pré-estabelecidos pelo usuário: a uniformidade de distribuição (%) e a pressão final de operação (m.c.a). Também deve ser fornecida a pressão de entrada (m.c.a); a vazão desejada por metro linear ( $\text{L.h}^{-1}$ ); à variação de vazão por metro linear (%); o fator de proporcionalidade do emissor; o expoente de descarga do emissor; o diâmetro da tubulação (mm); a área transversal da tubulação com o gotejador ( $\text{mm}^2$ ); e o coeficiente de rugosidade para a equação de perda de carga de Hazen-Williams.



O programa possibilita três dimensionamentos distintos:

- a) Opção 1: o modelo de simulação define o comprimento e o espaçamento entre gotejadores nos dois trechos que compõem a linha lateral, com espaçamentos variando de 1 em 1 cm, a partir de 0,01 a 1 metro (CALC-1cm);
- b) Opção 2: o modelo de simulação define o comprimento e o espaçamento entre gotejadores nos dois trechos que compõem a linha lateral, com espaçamentos variando de 5 em 5 cm, começando em 0,05 até 1 metro (CALC-5cm);
- c) Opção 3: o modelo define os comprimentos de cada trecho da linha lateral utilizando dois espaçamentos pré-estabelecidos pelo usuário, podendo estes serem iguais ou distintos (CALC-pré).

O cálculo com espaçamento indicado pelo usuário possibilita a simulação com espaçamentos iguais nos dois trechos da linha. Isso foi utilizado, neste estudo, para fins de comparação dos resultados, permitindo a análise de viabilidade da adoção dois espaçamentos para alcance de maiores comprimentos de linha lateral, dentro desse método.

Na Figura 3 é possível observar a tela inicial do software, com a disposição dos dados de entrada.

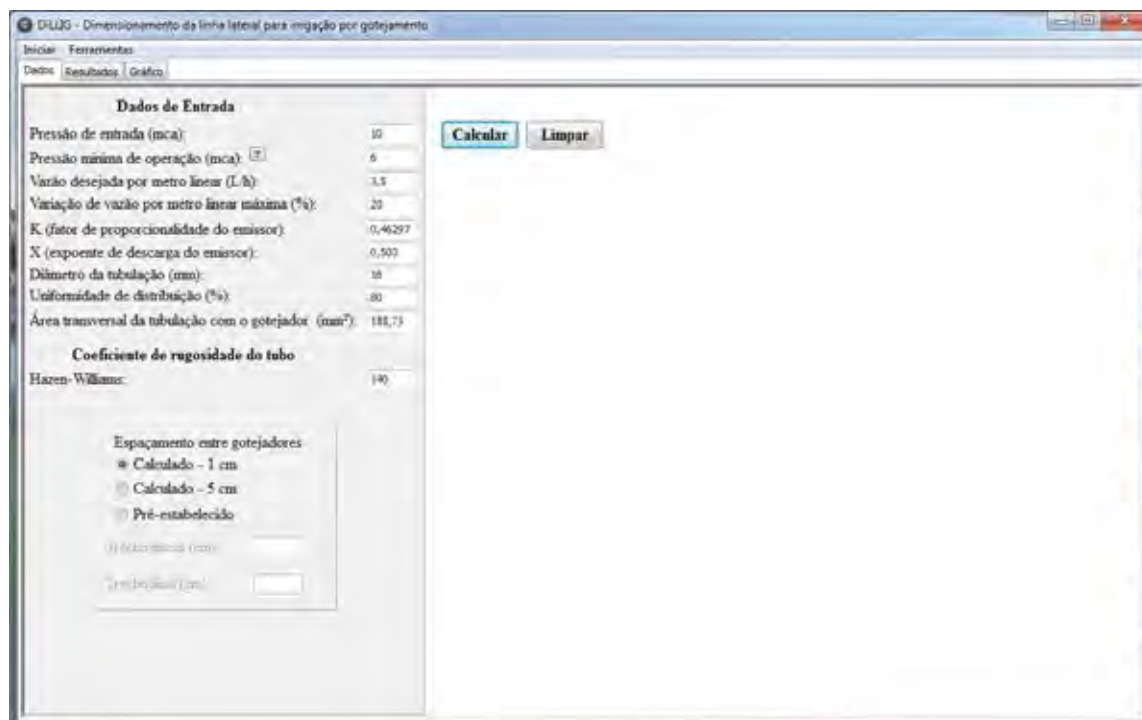


Figura 3 – Tela inicial do software desenvolvido em Delphi®.

As etapas para a realização dos cálculos foram organizadas de forma a tornar o programa funcional, sendo o primeiro cálculo realizado o da variação de pressão, o qual é feito pela equação 2.

A etapa seguinte corresponde à obtenção dos espaçamentos entre gotejadores, realizada pela determinação das vazões do gotejador de entrada e final (equação 21) e pela determinação dos limites de vazão por metro linear (equações 33 e 34). Com a obtenção destes dados, o programa calcula dois espaçamentos por trecho, pelas equações 35 e 36 para o trecho inicial, e equações 37 e 38 para o final. Posteriormente realiza a média em cada trecho e encontra os espaçamentos que são utilizados nos cálculos (equações 39 e 40).

$$ql_i = \frac{ql_d}{\left\{ 1 + \left[ \frac{(\Delta ql/2)}{100} \right] \right\}} \quad (33)$$

$$ql_s = ql_d \left\{ 1 + \left[ \frac{(\Delta ql/2)}{100} \right] \right\} \quad (34)$$

em que:

$ql_i$  = limite inferior de vazão por metro linear ( $L h^{-1} m^{-1}$ );  
 $ql_s$  = limite superior de vazão por metro linear ( $L h^{-1} m^{-1}$ );  
 $ql_d$  = vazão desejada por metro linear ( $L h^{-1} m^{-1}$ );  
 $\Delta ql$  = variação de vazão por metro linear máxima (%).

$$Se_{1i} = \frac{q_e}{ql_i} \quad (35)$$

$$Se_{1f} = \frac{q_e}{ql_s} \quad (36)$$

$$Se_{2i} = \frac{q_f}{ql_i} \quad (37)$$

$$Se_{2f} = \frac{q_f}{ql_s} \quad (38)$$

em que:

$q_e$  e  $q_f$  = vazão do gotejador de entrada e final ( $L h^{-1}$ ), respectivamente;

$Se_{1i}$  e  $Se_{1f}$  = espaçamentos calculados utilizando os limites inferior e superior de vazão por metro linear (m), respectivamente, para o trecho inicial;

$Se_{2i}$  e  $Se_{2f}$  = espaçamentos calculados utilizando os limites inferior e superior de vazão por metro linear (m), respectivamente, para o trecho final.

$$Se_1 = \frac{Se_{1i} + Se_{1f}}{2} \quad (39)$$

$$Se_2 = \frac{Se_{2i} + Se_{2f}}{2} \quad (40)$$

Para tornar possível o dimensionamento, gotejador a gotejador, os cálculos iniciaram a partir do último emissor, como pode ser observado na Figura 4.

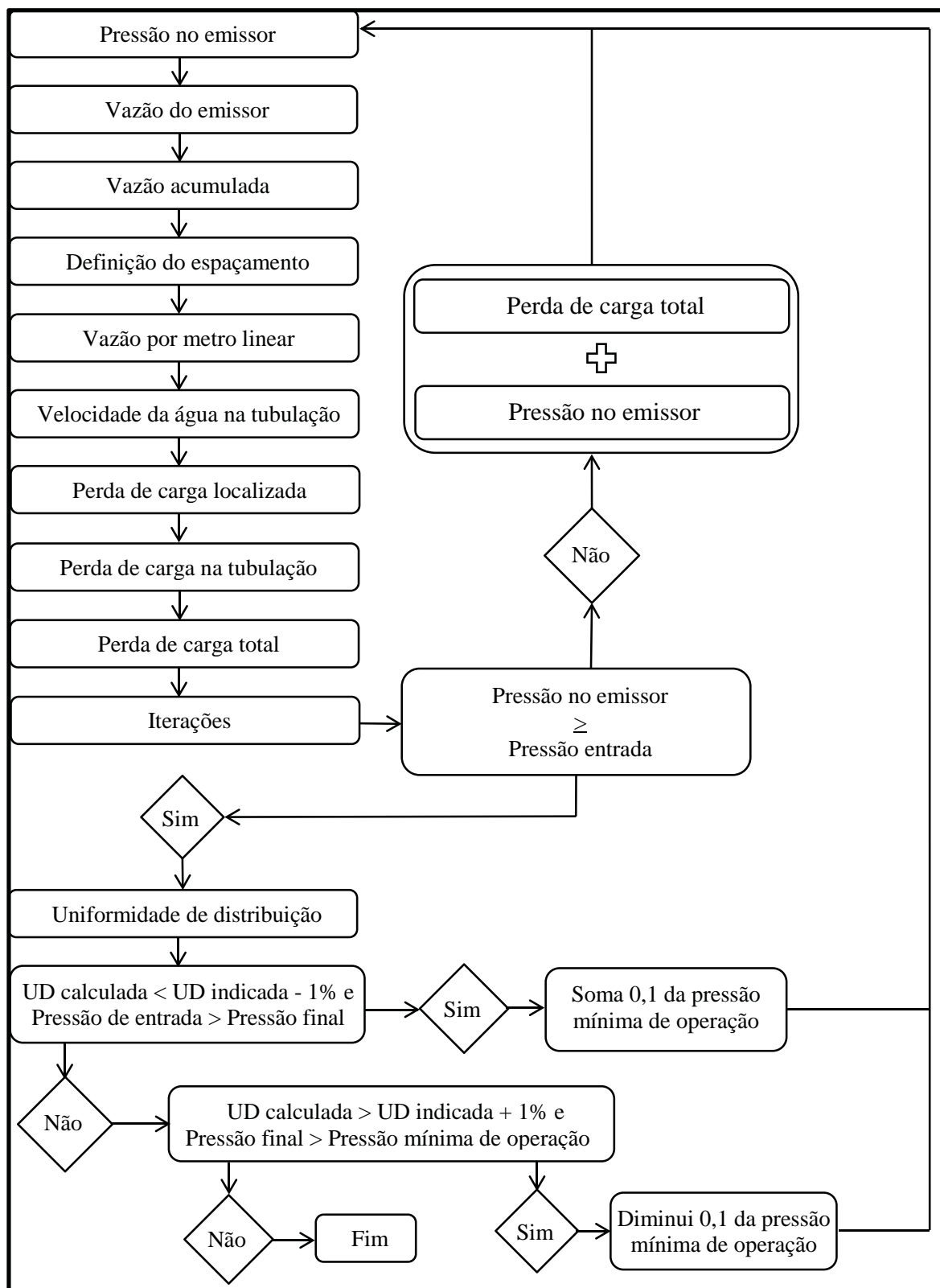


Figura 4 – Fluxograma das etapas desenvolvidas pelo modelo em Delphi®.

A seguir são explicados os processos realizados em cada um dos passos demonstrados na Figura 4.

a) Pressão no emissor

No primeiro momento a pressão no último emissor é igual à pressão mínima, indicada nos dados de entrada, a qual deverá sempre ser superior a pressão mínima de operação do emissor. Este valor foi programado para alterar até que a UD calculada esteja a  $\pm 1\%$  da UD indicada.

b) Vazão do emissor

A vazão do emissor é calculada a partir da equação 21.

c) Vazão acumulada

A vazão acumulada corresponde à vazão na tubulação no ponto do gotejador, alcançada pelo somatório das vazões dos emissores a partir daquele ponto.

d) Vazão por metro linear

A vazão por metro linear é obtida pela equação 22.

e) Definição do espaçamento a utilizar

O programa escolhe qual espaçamento utilizar, obtendo a distância entre os emissores, calculada pela equação 22, em que ao invés de  $q_1$  utiliza a média dos limites de vazão encontrados pelas equações 33 e 34. Em seguida, testa se o valor da média é maior ou menor que a média dos espaçamentos encontrados pelas equações 39 e 40 e adota  $Se_1$  se maior e  $Se_2$  se menor.

f) Velocidade da água na tubulação

A velocidade da água no tubo é calculada pela equação 9.

g) Perda de carga

A perda de carga total é obtida em três etapas. Na primeira o programa calcula a perda de carga localizada no emissor, pela equação 16. Na segunda obtém a perda de carga na tubulação utilizando a equação de Hazen-Williams (equação 6). Por último calcula a perda de carga total, a partir da soma da localizada e da tubulação.

Terminado o cálculo para o último gotejador tem-se início as repetições para cada gotejador sucessivamente.

h) Iterações

Neste processo a vazão do emissor, a vazão por metro linear, a vazão acumulada, a definição do espaçamento a utilizar, a velocidade da água na tubulação, e as perdas de carga são calculadas da mesma forma que para o último emissor. O que difere é o cálculo da pressão no emissor, realizado pela soma da pressão e da perda de carga total, do gotejador anterior.

As repetições são realizadas até que a pressão no emissor seja igual ou superior ao definido nos dados de entrada. Após chegar a este ponto o software indica o número de gotejadores e calcula o comprimento da linha pelo somatório dos espaçamentos entre emissores; a variação de vazão (equação 1); e por último a uniformidade de distribuição pela equação 4.

Se a uniformidade de distribuição calculada for menor que a indicada menos 1%, e a pressão de entrada for maior que a final o software somará 0,1 a pressão final e repetira os cálculos. Por outro lado, caso a uniformidade de distribuição calculada seja maior que a indicada mais 1%, e a pressão no fim for maior que a mínima de operação o software diminuirá 0,1 a pressão mínima e repetira os cálculos.

Esta repetição ocorrerá até que a UD, e a pressão final se encontrem dentro dos limites estabelecidos a partir dos dados de entrada, ou seja, o programa apontará a melhor escolha a ser realizada dentro dos requisitos pré-estabelecidos pelo operador.

### **3.3 Procedimento usual de dimensionamento do comprimento da linha lateral**

O procedimento usual consiste em calcular o comprimento máximo da linha lateral de gotejadores a partir a equação de perda de carga. No caso de gotejadores não autocompensantes, as linhas laterais operam em nível. Desta forma, toda a variação de pressão é decorrente da perda de carga total (na tubulação e localizada nos emissores). Considerando a variação permitida de pressão na linha lateral, tem-se a perda de carga total. Além disso, o diâmetro interno da tubulação adotado nesse estudo, por ser o mais utilizado comercialmente, é de 16 mm. Desta forma, o comprimento da tubulação passa a ser a única variável a ser definida.

Utilizando a equação de Darcy-Weisbach e combinando com as equações 8, 10, 12, 15 e 20, obtém-se a equação 41.

$$L = \left( \frac{1281,11650554 \, hf' \, Se^{1,75} \, D^{4,75}}{q^{1,75} \, F} \right)^{1/2,75} \quad (41)$$

Em que:

hf' = Perda de carga ajustada;

Se = Espaçamento entre emissores (m);

D = Diâmetro da tubulação (m);

q = Vazão do emissor (L h<sup>-1</sup>);

F = Fator de ajuste de Christiansen.

A partir da equação 41 encontra-se o comprimento da linha lateral. Os dados utilizados, e obtidos neste dimensionamento, foram considerados para a determinação da UD e da variação de vazão, calculados gotejador a gotejador com auxílio de planilha eletrônica.

### 3.4 Comparações entre os modelos

Após a realização dos cálculos nos diferentes métodos a análise ocorreu a partir da comparação entre eles. Assim, para facilitar a compreensão, os dados foram organizados em planilha específica no Excel<sup>®</sup>, de forma que possibilitasse a visualização por método de cálculo e de acordo com as variações de pressão.

Os resultados foram reunidos e sistematizados em tabelas, de maneira que permitisse a comparação entre o número de espaçamentos utilizados; pressão de entrada; pressão final; espaçamento entre os gotejadores; número de gotejadores; comprimento da linha; uniformidade de distribuição; variação de vazão por metro linear; variação de vazão do emissor e variação de pressão e método de cálculo.

#### **4 RESULTADOS**

Após a obtenção dos dados nas metodologias descritas, estes foram lançados em uma planilha eletrônica em que foi possível criar uma simulação passo-a-passo do dimensionamento. Para isso, utilizou-se o Excel<sup>®</sup>, no qual os dados foram sistematizados e os cálculos realizados emissor a emissor.

Para cada método de cálculo realizado construiu-se uma tabela primária de análise de dados, no formato da Tabela 6, a qual exemplifica o cálculo realizado no software desenvolvido em Delphi<sup>®</sup>, com 20% de variação de pressão.



Tabela 6 - Organização dos dados para o cálculo realizado no Delphi® com 20% de variação de pressão.

N	H (m.c.a)	Se (m)	qe (L h <sup>-1</sup> )	Qt (m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> )	ql (L h <sup>-1</sup> m <sup>-1</sup> )	V (m s <sup>-1</sup> )	hfg (m.c.a)	hf (m.c.a)	Hft (m.c.a)
1	8,00	0,38	1,318	3,66E-07	3,47	1,82E-03	7,22E-10	2,99E-07	2,99E-07
2	8,00	0,38	1,318	7,32E-07	3,47	3,64E-03	2,89E-09	1,08E-06	1,08E-06
3	8,00	0,38	1,318	1,10E-06	3,47	5,46E-03	6,50E-09	2,28E-06	2,29E-06
L <sub>2</sub>	.	.	.	.	.	.	.	.	.
	.	.	.	.	.	.	.	.	.
	.	.	.	.	.	.	.	.	.
288	9,09	0,38	1,405	1,07E-04	3,70	5,33E-01	6,20E-05	1,09E-02	1,10E-02
289	9,10	0,38	1,406	1,08E-04	3,70	5,35E-01	6,24E-05	1,10E-02	1,11E-02
290	9,11	0,42	1,407	1,08E-04	3,35	5,37E-01	6,29E-05	1,22E-02	1,23E-02
291	9,12	0,42	1,408	1,08E-04	3,35	5,39E-01	6,33E-05	1,23E-02	1,24E-02
292	9,13	0,42	1,409	1,09E-04	3,35	5,41E-01	6,38E-05	1,24E-02	1,25E-02
L <sub>1</sub>	.	.	.	.	.	.	.	.	.
	.	.	.	.	.	.	.	.	.
	.	.	.	.	.	.	.	.	.
348	9,97	0,42	1,472	1,31E-04	3,50	6,53E-01	9,28E-05	1,75E-02	1,76E-02
349	9,99	0,42	1,473	1,32E-04	3,51	6,55E-01	9,33E-05	1,76E-02	1,77E-02
350	10,01	0,42	1,475	1,32E-04	3,51	6,57E-01	9,39E-05	1,78E-02	1,78E-02

N= número do emissor; H= pressão de entrada; Se= espaçamento entre emissores; qe= vazão do emissor; Qt= vazão acumulada; ql= vazão por metro linear; V= velocidade da água; hfg= perda de carga localizada; hf= perda de carga na tubulação; Hft= perda de carga total.

Essa forma de organização possibilitou a comparação entre os dados de análise.

#### 4.1 Modelo desenvolvido em GAMS®

O modelo de PNL desenvolvido em GAMS® possibilitou o dimensionamento da linha lateral para irrigação por gotejamento utilizando dois trechos com espaçamentos distintos. A sistematização dos cálculos em planilhas eletrônica permitiu a

análise mais detalhada dos resultados. Na Tabela 7 é possível observar os valores obtidos para o número de emissores e comprimento de cada trecho, além do comprimento e vazão total da linha, para as variações de pressão calculadas.

Tabela 7 - Pressão de entrada da linha (H ent.), pressão no final da linha (H fim.), espaçamento entre gotejadores (Esp.), número de gotejadores por trecho, comprimento por trecho, comprimento total (L), e vazão de entrada da linha lateral (Q) para as variações de pressão avaliadas.

$\Delta H$	H ent. (m.c.a)	H fim. (m.c.a)	Espaçamento (m)		Nº de gotejadores		L (m)			Q (L h <sup>-1</sup> )
			Inicial	Final	Inicial	Final	Inicial	Final	Total	
10%	10,04	9,00	0,48	0,47	109	143	52,43	67,07	119,50	357,52
15%	10,05	8,50	0,48	0,46	128	168	60,93	76,78	137,70	411,34
20%	10,06	8,00	0,47	0,44	144	190	67,68	84,36	152,04	454,07
25%	10,06	7,50	0,47	0,43	159	210	73,94	90,72	164,66	490,18
30%	10,07	7,00	0,46	0,42	174	229	79,87	95,72	175,59	522,38
35%	10,06	6,50	0,45	0,41	188	248	85,16	100,44	185,60	550,53
40%	10,04	6,00	0,45	0,39	201	268	89,65	104,79	194,43	575,68

Observa-se que os espaçamentos ficaram entre 0,39 (para o segundo trecho de  $\Delta H$  de 40%) e 0,48 metros (para o primeiro trecho de  $\Delta H$  de 10%). Em todos os cálculos realizados o espaçamento do trecho inicial foi superior ao do trecho final. Isto está relacionado ao fato da pressão nos emissores, os quais não são autocompensantes, ser maior no primeiro trecho, o que gera uma maior vazão por gotejador, permitindo maiores espaçamentos com manutenção da vazão por metro linear. À medida que a pressão vai diminuindo, ao longo da linha lateral, a vazão por emissor também diminuirá, e isto faz com que o modelo escolha um espaçamento menor para o segundo trecho, mantendo a vazão por metro linear mais uniforme ao longo do comprimento total da linha lateral.

Observa-se na Tabela 8 que, até o ponto de troca dos espaçamentos, já se tinha consumido, em média, 81% da perda de carga total. Também se verificou que o primeiro trecho representa em torno de 45% do comprimento total da linha, diferente ao valor de 40% adotado por Andrade (2009).

Tabela 8 – Ponto de troca dos espaçamentos e perda de carga acumulada até a troca dos espaçamentos.

$\Delta H$	Ponto troca dos espaçamentos	hf acumulada até o ponto de troca espaçamentos
10%	43,88%	79,62%
15%	44,25%	80,13%
20%	44,51%	80,55%
25%	44,90%	81,02%
30%	45,48%	81,60%
35%	45,88%	82,07%
40%	46,11%	82,61%
<b>Média</b>	<b>45,00%</b>	<b>81,09%</b>

Ao analisar os resultados dos cálculos realizados pelo modelo quando se considerou a uniformidade de distribuição, uniformidade de emissão, a variação de vazão, variação de vazão por metro linear e o comprimento da linha percebeu-se que a utilização da maior variação de pressão (40%) traria vantagens frente às demais, o que pode ser verificado na Tabela 9. Percebeu-se ainda que, apesar dos menores valores de uniformidade de distribuição e uniformidade de emissão, da maior variação de vazão dos emissores e da maior variação de vazão por metro linear, quando se utilizou  $\Delta H$  de 40%, o ganho no comprimento foi de 42,39m, comparado ao  $\Delta H$  de 20% e ainda assim, os valores de  $\Delta q$  e UD encontram-se dentro dos limites propostos por Wu (1997).

Tabela 9 – Uniformidade de distribuição (UD), Uniformidade de emissão (UE), variação de vazão ( $\Delta q$ ), variação de vazão por metro linear ( $\Delta ql$ ) e comprimento máximo da linha lateral, para as variações de pressão avaliadas utilizando o modelo de PNL.

$\Delta H$	UD (%)	UE (%)	$\Delta q$ (%)	$\Delta ql$ (%)	L (m)
10%	98,58	94,13	5,35	4,28	119,50
15%	97,80	93,37	8,09	6,49	137,70
20%	96,98	92,58	10,87	8,71	152,04
25%	96,11	91,72	13,74	11,03	164,66
30%	95,16	90,79	16,71	13,46	175,59
35%	94,13	89,79	19,74	15,93	185,60
40%	93,04	88,72	22,82	18,40	194,43

Comparando-se as uniformidades de distribuição e emissão, percebe-se que a UE apresentou menores índices, isto pode estar relacionado ao fato de esta ser mais restritiva quando considera a menor vazão do emissor. No entanto, apesar desta redução os valores encontram-se acima de 88%.

O modelo foi construído para dimensionar a linha de forma que maximizasse o comprimento, selecionando os espaçamentos entre emissores que tornassem a vazão por metro a mais uniforme possível. Essa relação pode ser vista nas Figura 5 e 6 para os  $\Delta H$  de 20 e 40%, respectivamente.

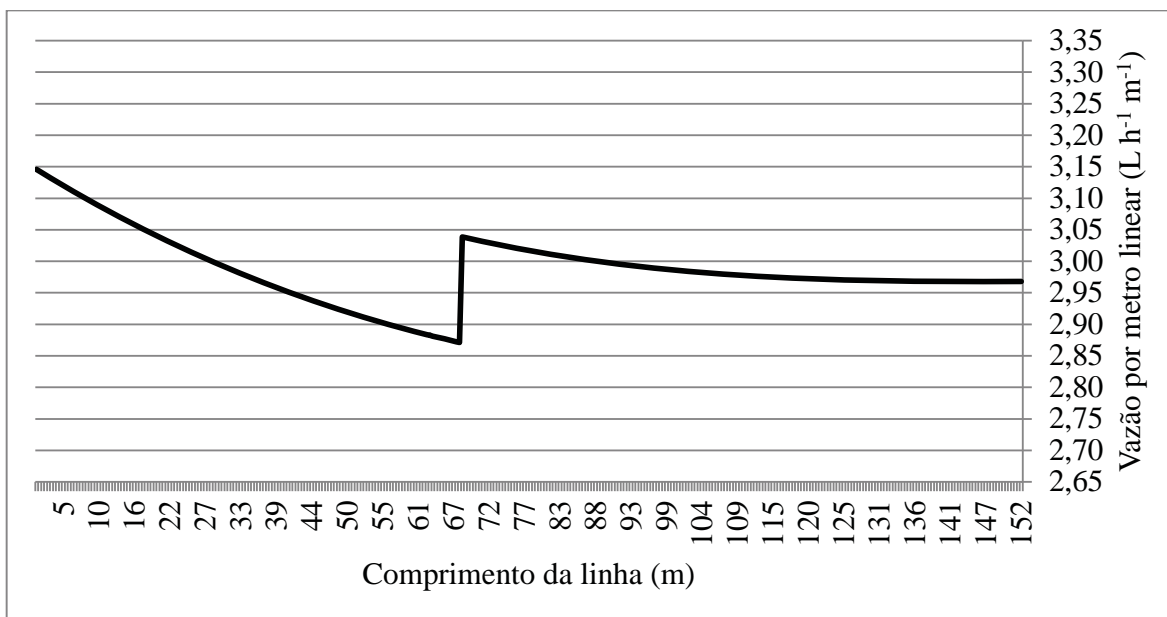


Figura 5 - Vazão por metro linear, em relação ao comprimento da linha, para 20% de variação de pressão.

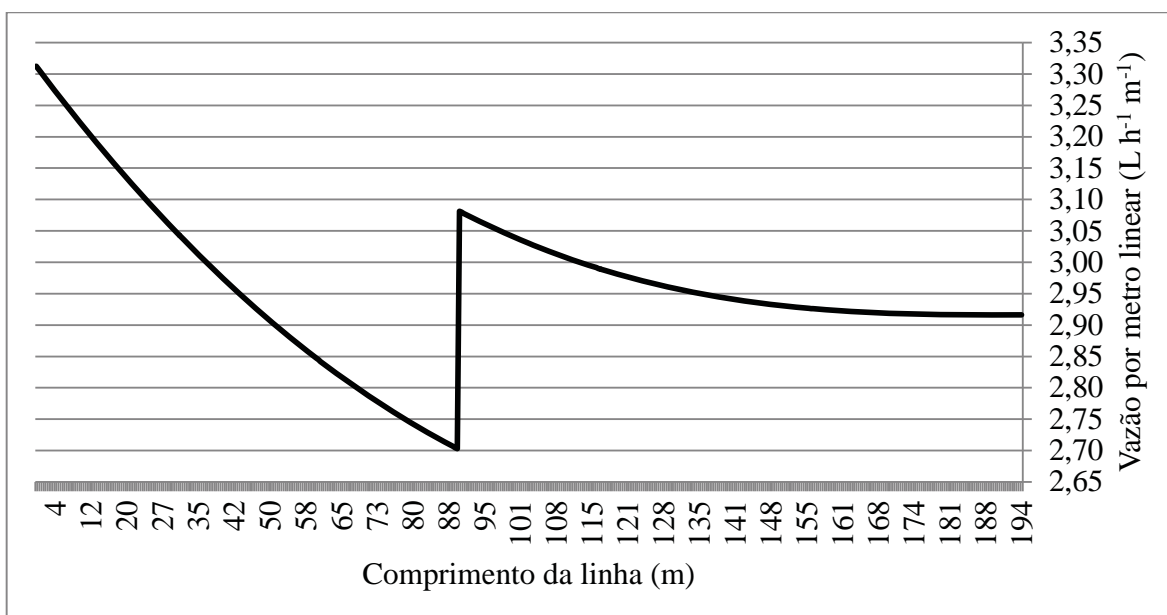


Figura 6 – Vazão por metro linear, em relação ao comprimento da linha, para 40% de variação de pressão.

Observa-se que no momento da troca do espaçamento entre gotejadores a vazão passa de 2,87 para 3,03 L h<sup>-1</sup> m<sup>-1</sup>, e de 2,7 para 3,07 L h<sup>-1</sup> m<sup>-1</sup> nas variações de pressão de 20 e 40%, respectivamente. Também é possível verificar que a maior

vazão por metro encontra-se no início da linha, com 3,14 (para 20%) e 3,29 L h<sup>-1</sup> m<sup>-1</sup> (para 40%), e a menor no momento da troca dos espaçamentos. No final da linha a vazão por metro linear foi de 2,97 e 2,92 L h<sup>-1</sup> m<sup>-1</sup> para os  $\Delta H$  de 20 e 40%, respectivamente.

Desta forma, e a partir dos pressupostos apresentados neste capítulo é possível entender que mesmo que a linha lateral apresente maior  $\Delta q$  e  $\Delta q_l$ , a UD ficará em padrões aceitáveis, tendo ficado acima de 93%, permitindo assim o fornecimento de água em níveis adequados para as culturas e diminuição dos custos de implantação do sistema de irrigação, pelo aumento no comprimento da linha.

#### **4.2 Modelo de Simulação desenvolvido em Delphi®**

O software DiLLIG - Dimensionamento da linha lateral para irrigação por gotejamento, desenvolvido em Delphi®, permitiu o dimensionamento com a utilização tanto de dois quanto de um espaçamento entre emissores na linha lateral. Para avaliar o potencial do modelo de simulação considerou-se, para cada variação de pressão, três possibilidades de dimensionamento (Tabela 10): linha lateral com o uso de dois espaçamentos calculados, com variação permissível de 1cm (CALC-1cm); linha lateral com dois espaçamentos calculados, com variação de 5cm (CALC-5cm); e linha lateral com um único espaçamento pré-indicado (CALC-pré).

Verifica-se que os espaçamentos utilizados pelo modelo estão próximos a 0,40 m. Com relação ao comprimento de linha, verificou-se no software desenvolvido que a utilização de um único espaçamento traria comprimentos de linha maiores quando comparado ao uso de dois espaçamentos. O maior comprimento obtido ocorreu com espaçamento único de 0,40 m e  $\Delta H$  de 40%, alcançando 193,20 m, o que representa 21,7 m a mais que o cálculo com dois espaçamentos (Tabela 10).

Os espaçamentos obtidos pelas diferentes formas de cálculo são todos iguais no primeiro trecho para os  $\Delta H$  calculados. Isto ocorreu porque o cálculo do espaçamento é realizado considerando a pressão de entrada e final da linha e a variação de vazão por metro linear. Como a pressão de entrada e a variação de vazão por metro são iguais em todas as análises, o espaçamento inicial é o mesmo, por outro lado no trecho final o espaçamento diminui à medida que aumenta o  $\Delta H$ .

Tabela 10 – Resumo dos resultados para as opções de dimensionamento, fornecendo a pressão de entrada da linha (H ent.), os espaçamentos entre emissores por trecho, o número de gotejadores por trecho, comprimento por trecho e comprimento total (L), para as variações de pressão calculadas.

$\Delta H$ (%)	Opção	H ent. (m.c.a)	Espaçamento entre emissores (m)		Nº de gotejadores no trecho		Comprimento (m)		
			Inicial	Final	Inicial	Final	Inicial	Final	Total
10	CALC-1cm	10,01	0,42	0,40	46	218	19,32	87,20	106,52
	CALC-5cm	10,02	0,40	0,40		266		106,40	106,40
	CALC-pré	10,02		0,40		266		106,40	106,40
15	CALC-1cm	10,01	0,42	0,39	54	256	22,68	99,84	122,52
	CALC-5cm	10,02	0,40	0,40		311		124,40	124,40
	CALC-pré	10,02		0,40		311		124,40	124,40
20	CALC-1cm	10,01	0,42	0,38	61	289	25,62	109,82	135,44
	CALC-5cm	10,02	0,40	0,40		350		140	140,00
	CALC-pré	10,02		0,40		350		140,00	140,00
25	CALC-1cm	10,00	0,42	0,34	66	321	27,72	138,67	146,49
	CALC-5cm	10,04	0,40	0,35	137	234	54,80	81,90	136,70
	CALC-pré	10,03	0,40	0,00		385		154,00	154,00
30	CALC-1cm	10,01	0,42	0,35	83	341	34,86	119,35	154,21
	CALC-5cm	10,04	0,40	0,35	123	303	49,20	106,05	155,25
	CALC-pré	10,02		0,40		418		167,20	167,20
35	CALC-1cm	10,01	0,42	0,34	85	375	35,70	127,50	163,20
	CALC-5cm	10,05	0,40	0,35	105	356	42,00	124,60	166,60
	CALC-pré	10,05		0,40		451		180,40	180,40
40	CALC-1cm	10,01	0,42	0,33	87	409	36,54	134,97	171,51
	CALC-5cm	10,04	0,40	0,35	93	402	37,20	140,70	177,90
	CALC-pré	10,06		0,40		483		193,20	193,20

Para o método de cálculo que define os valores dos dois espaçamentos variando de 1 em 1 cm o comprimento do primeiro trecho correspondeu a aproximadamente 20% do comprimento total da linha. No entanto, para a variação de 5 cm e  $\Delta H$  de 25% ficou próximo aos 40% adotado por Andrade (2009). Foi a partir dessa variação que o modelo utilizou espaçamentos distintos. Também foi possível identificar que até a realização da troca, utilizando a variação de 1 cm, a perda de carga na linha variou de 42 a 51% do total. Já com a utilização da variação de 5 cm, a perda de carga na linha, no ponto de troca, ficou entre 48 a 79% (Tabela 11).

Tabela 11- Ponto de troca do espaçamento entre emissores, expresso em % do comprimento total, e perda de carga até esse ponto, expressa como % da perda de carga total, para os  $\Delta H$  avaliados no software desenvolvido em Delphi®.

$\Delta H$ (%)	Opção de dimensionamento			
	CALC-1cm		CALC-5cm	
	Ponto troca do espaçamento (% do comprimento total)	hf na troca do espaçamento (% da hf total)	Ponto troca do espaçamento (% do comprimento total)	hf na troca do espaçamento (% da hf total)
10	18,14%	42,06%	-	-
15	18,51%	43,35%	-	-
20	18,92%	44,50%	-	-
25	18,92%	44,82%	43,24%	79,04%
30	22,61%	51,40%	31,69%	65,52%
35	21,88%	50,15%	25,21%	55,91%
40	21,30%	49,30%	20,91%	48,81%

Em todas as opções e  $\Delta H$  avaliados pelo modelo de simulação obteve-se uma variação de vazão inferior ao valor recomendado por Wu (1997), tendo como valor máximo 22,88%, obtido com a utilização de espaçamento único e  $\Delta H$  de 40% (Tabela 12). Além disso, o comprimento da linha para este cálculo foi 53,2 m superior ao valor obtido com o  $\Delta H$  de 20%, usualmente adotado.



Tabela 12 - Dados de vazão (Q), uniformidade de distribuição (UD), uniformidade de emissão (UE), variação de vazão por metro linear ( $\Delta q_l$ ), variação de vazão entre emissores ( $\Delta q$ ) e comprimento da linha lateral (L), obtidos para o modelo de simulação desenvolvido no Delphi<sup>®</sup>.

$\Delta H$	Nº de espaçamentos	Q (L h <sup>-1</sup> )	UD (%)	UE (%)	$\Delta q_l$ (%)	$\Delta q$ (%)	L (m)
10%	CALC-1cm	374,37	98,62%	94,17	4,72%	5,23%	106,52
	CALC-5cm	377,29	98,60%	94,15	5,24%	5,24%	106,40
	CALC-pré	377,29	98,60%	94,15	5,24%	5,24%	106,40
15%	CALC-1cm	430,43	97,87%	93,45	7,10%	7,90%	122,52
	CALC-5cm	432,05	97,83%	93,40	7,92%	7,92%	124,40
	CALC-pré	432,05	97,83%	93,40	7,92%	7,92%	124,40
20%	CALC-1cm	475,27	97,09%	92,69	9,47%	10,64%	135,44
	CALC-5cm	475,80	96,98%	92,58	10,73%	10,73%	140,00
	CALC-pré	475,80	96,98%	92,58	10,73%	10,73%	140,00
25%	CALC-1cm	513,26	96,71%	92,30	11,84%	13,47%	146,49
	CALC-5cm	517,58	96,19%	91,81	12,46%	13,65%	136,70
	CALC-pré	511,51	96,08%	91,70	13,58%	13,58%	154,00
30%	CALC-1cm	548,24	95,38%	91,02	16,61%	16,45%	154,21
	CALC-5cm	551,45	95,27%	90,91	12,45%	16,58%	155,25
	CALC-pré	542,06	95,11%	90,75	16,53%	16,53%	167,20
35%	CALC-1cm	579,17	94,37%	90,05	18,98%	19,53%	163,20
	CALC-5cm	581,44	94,21%	89,89	12,43%	19,67%	166,60
	CALC-pré	570,23	93,99%	89,67	19,68%	19,68%	180,40
40%	CALC-1cm	606,90	93,30%	89,00	21,36%	22,71%	171,51
	CALC-5cm	607,27	93,08%	88,77	13,65%	22,83%	177,90
	CALC-pré	594,31	92,79%	88,51	22,88%	22,88%	193,20

Verifica-se que da mesma forma que ocorreu no modelo em GAMS<sup>®</sup>, a UE apresentou menores índices em relação à UD. Constatou-se também, que os valores da UE encontram-se acima de 88%.

Ao observar-se a vazão por metro linear, com a utilização de dois espaçamentos, verificou-se que a maior diferença encontra-se no momento da troca dos espaçamentos entre os gotejadores, sendo diretamente proporcional ao  $\Delta H$ , o que pode ser observado nas Figura 7 e 8.

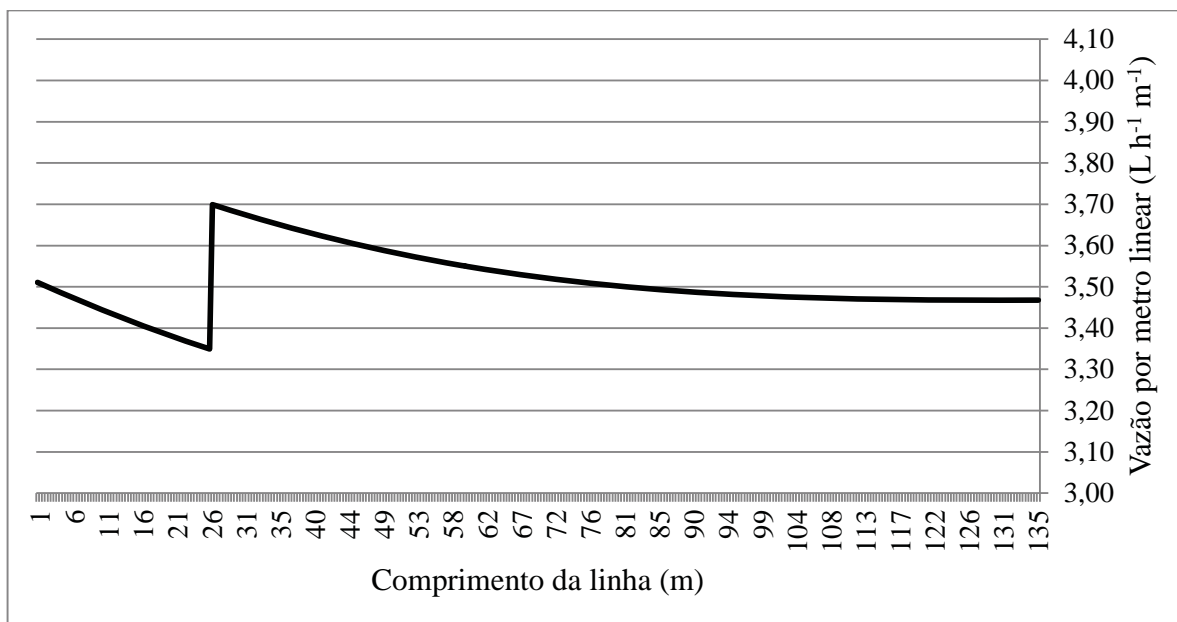


Figura 7 - Vazão por metro linear, em relação ao comprimento da linha, para 20% de variação de pressão e espaçamentos calculados.

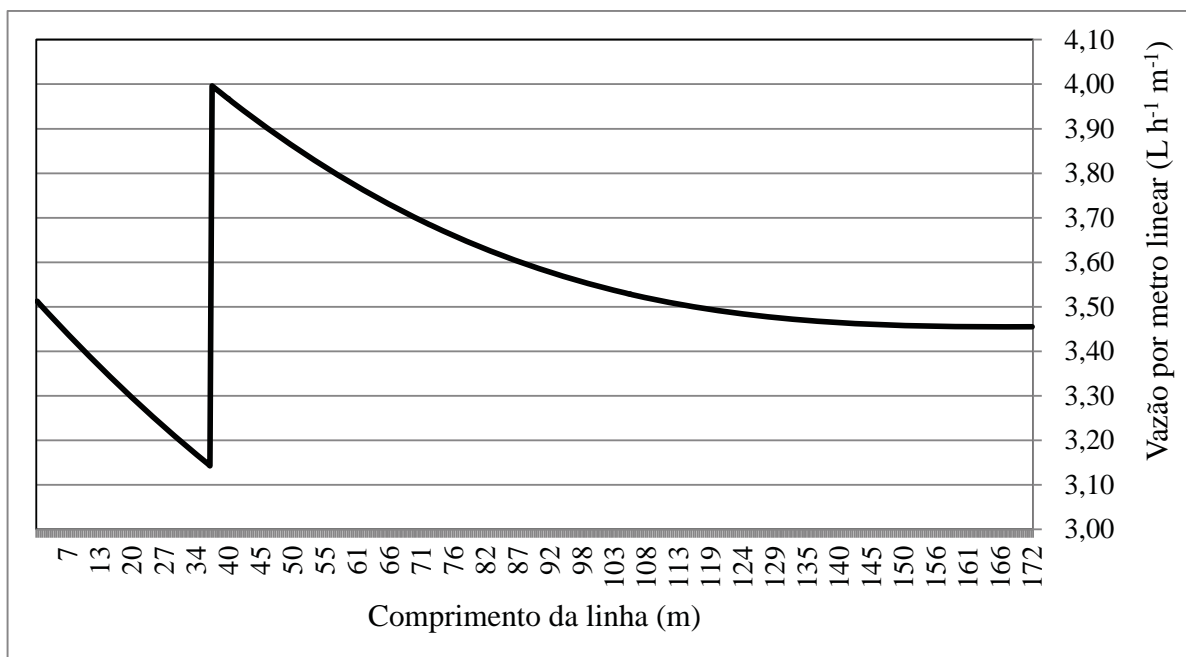


Figura 8 - Vazão por metro linear, em relação ao comprimento da linha, para 40% de variação de pressão e espaçamentos calculados.

Comparando-se as vazões por metro linear, antes e depois da troca dos espaçamentos, percebeu-se uma alteração de 3,35 para 3,7 L h<sup>-1</sup> m<sup>-1</sup> no  $\Delta H$  de 20% e de 3,14

para 3,98 no  $\Delta H$  de 40%. É possível verificar ainda, em ambas as variações de pressão que a vazão por metro linear no início e no final da linha encontram-se próximas a  $3,5 \text{ L h}^{-1} \text{ m}^{-1}$ , valor indicado nos dados de entrada.

Ao analisar os resultados expressos nas Figura 7 e 8 foi possível perceber que a variação de vazão por metro linear ficou com valores próximos no primeiro e segundo trecho para os  $\Delta H$  avaliados, obtendo-se valores médios de 5 e 12%, respectivamente, para os  $\Delta H$  de 20 e 40%. Na comparação dos trechos, entre os  $\Delta H$  de 20 e 40%, verificou-se uma diferença de 5,98% e 7,3%, para os trechos 1 e 2, respectivamente. Isso resulta em um  $\Delta q_l$  de aproximadamente 13%, na comparação entre as duas variações de pressão. Apesar desta diferença, houve um aumento no comprimento da linha em 36 metros com diminuição de apenas 3,79% da UD, o que pode tornar a utilização do  $\Delta H$  de 40% compensatória.

Com a utilização de espaçamento único, o comprimento da linha tornou-se ainda maior em relação ao espaçamento duplo, aumentando 5,56 m para  $\Delta H$  de 20% e 21,69 m para 40% (Figura 9 e Tabela 12), sem grandes diferenças na  $\Delta q_l$  e com UD superior a 92%.

Na Figura 9 ficou evidenciado o aumento do comprimento da linha quando utilizado uma variação de pressão de 40% em espaçamento único, chegando a alcançar 40 m a mais em relação ao  $\Delta H$  de 20%, tendo uma variação de vazão por metro linear no final da linha de 13% entre elas.

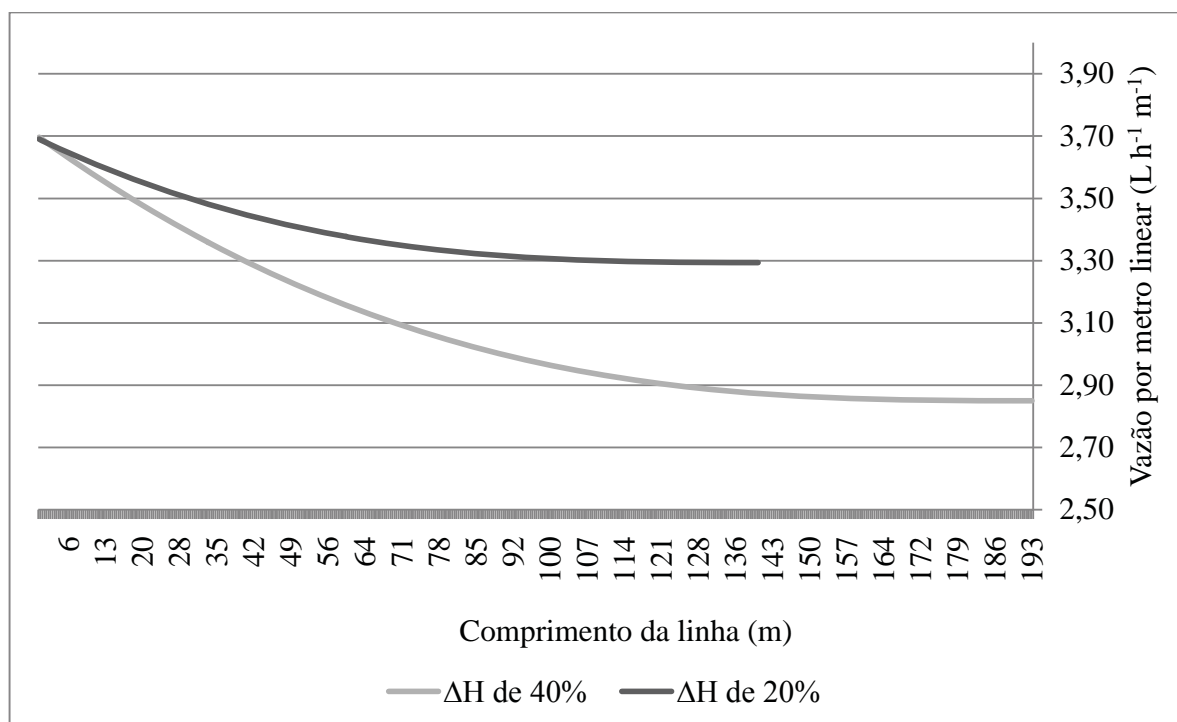


Figura 9 - Vazão por metro linear, em relação ao comprimento da linha, para 20 e 40% de variação de pressão e espaçamento único.

A utilização de espaçamento único com uma variação de pressão de 40% levou ao maior comprimento de linha lateral, entre os cálculos realizados pelo software criado, chegando a 193,2 m.

### 4.3 Método usual

Este método de cálculo adota apenas espaçamento único entre gotejadores, tendo sido selecionado o valor de 0,40 m, após a verificação da média dos espaçamentos encontrados nos modelos anteriores que foi 0,417 m.

Assim, com o espaçamento entre gotejadores definido iniciou-se a realização dos cálculos do comprimento da linha lateral pela equação 41, para cada variação de pressão, conforme demonstração na equação 42, na qual foi adotado o  $hf'$  de 4 m.c.a; Se de 0,4 m; D de 0,016 m; q de 1,47 L h<sup>-1</sup>; e F de 0,35.

$$L = \left( \frac{1281,11650554 \cdot 4 \cdot 0,4^{1,75} \cdot 0,016^{4,75}}{1,47^{1,75} \cdot 0,35} \right)^{1/2,75} = 167,98m \quad (42)$$

Com a execução desse cálculo, para todos os  $\Delta H$ , encontrou-se o comprimento de linha lateral, dado utilizado na busca das variáveis complementares para as comparações, as quais são exibidas na Tabela 13. Essa foi construída após o dimensionamento da linha gotejador a gotejador, até alcançar o comprimento obtido pela equação 41.

Tabela 13 – Dados de pressão (H ent), variação de pressão ( $\Delta H$ ), número de gotejadores, vazão da linha, comprimento da linha (L), uniformidade de distribuição (UD), uniformidade de emissão (UE), variação de vazão por metro linear ( $\Delta q_l$ ), variação da vazão entre gotejadores ( $\Delta q$ ), obtidos para as variações de pressão calculadas.

$\Delta H$ (%)	H ent. (m.c.a)	H fim (m.c.a)	$\Delta H_c$ (%)	Nº de gotejadores	Q (L h <sup>-1</sup> )	L (m)	UD (%)	UE (%)	$\Delta q_l$ (%)	$\Delta q$ (%)
10	10,00	9,10	8,98	254	361,68	101,60	98,77	94,32	4,62	4,62
15	10,00	8,69	13,13	294	411,57	117,60	98,14	93,71	6,84	6,84
20	10,00	8,29	17,14	327	450,02	130,80	97,50	93,09	9,02	9,02
25	10,00	7,93	20,75	354	479,46	141,60	96,89	92,49	11,04	11,04
30	10,00	7,58	24,16	376	504,00	151,20	96,29	91,89	12,99	12,99
35	10,00	7,26	27,43	400	525,11	160,00	95,66	91,29	14,90	14,90
40	10,00	6,95	30,49	420	543,12	168,00	95,04	90,69	16,72	16,72

Em todas as análises realizadas foram encontrados valores de UD e UE superiores e  $\Delta q$  inferiores ao citado por Wu (1997). O  $\Delta H$  de 40% obteve as maiores diferenças, com UD de 95,04% e  $\Delta q$  de 16,72%. Este valor de  $\Delta H$  proporcionou ainda um comprimento da linha de 168 m, que é 37 m superior ao obtido com a utilização de  $\Delta H$  de 20%, com vazão por metro linear de 3,69 L h<sup>-1</sup> na entrada da linha para os  $\Delta H$  de 20% e 40%. Estas ainda deram uma variação de vazão por metro linear no final da linha de 3,35 e 3,07 L h<sup>-1</sup> m<sup>-1</sup>, respectivamente (Figura 10).

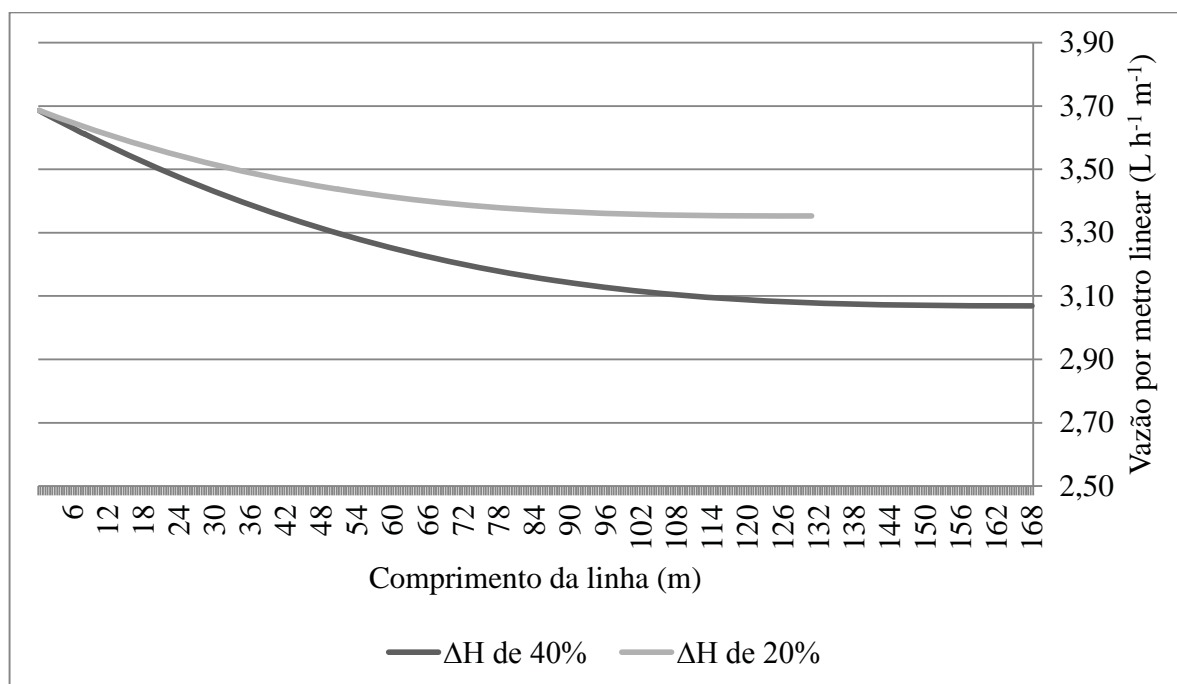


Figura 10 - Vazão por metro linear, em relação ao comprimento da linha, para 20 e 40% de variação de pressão.

Com isso, é possível perceber que o cálculo usualmente desenvolvido para definição do comprimento da linha lateral subdimensiona a mesma, pois não utiliza toda variação de pressão permitida.

#### 4.4 Comparações entre os modelos

Após a discussão individual dos dados obtidos por cada método de cálculo, fez-se a comparação entre eles, com o objetivo de proporcionar uma melhor compreensão.

Nas avaliações realizadas, verificou-se que a vazão média dos emissores esteve localizada entre 36,39 e 40,35% do início da linha, com variação de perda de carga acumulada entre 73,25 e 78,01% do total (Tabela 14). Estes valores estão de acordo com aqueles encontrados por Talens (2002).

Tabela 14 – Porcentagem do comprimento até o emissor de vazão média e perda de carga acumulada até este ponto, para as metodologias e variações de pressão estudadas.

$\Delta H$ (%)	GAMS <sup>®</sup>		Delphi <sup>®</sup>						Usual	
			CALC-1cm		CALC-5cm		CALC-pré		2 cálc.	
	Ponto de vazão média (% de L)	hf até o ponto de vazão média (% de hf total)	Ponto de vazão média (% de L)	hf até o ponto de vazão média (% de hf total)	Ponto de vazão média (% de L)	hf até o ponto de vazão média (% de hf total)	Ponto de vazão média (% de L)	hf até o ponto de vazão média (% de hf total)	Ponto de vazão média (% de L)	hf até o ponto de vazão média (% de hf total)
10	37,84	73,25	38,42	74,31	37,97	73,41	37,59	73,41	36,61	74,01
15	38,71	73,99	41,43	78,01	37,94	74,15	37,94	74,15	37,76	74,13
20	38,64	74,10	38,84	75,34	38,00	74,38	36,29	77,61	37,92	74,47
25	39,25	74,93	39,13	75,88	39,92	75,34	38,18	74,84	38,14	74,86
30	39,47	75,20	39,81	76,07	39,81	76,07	38,04	74,92	38,10	74,95
35	40,03	75,95	40,00	76,86	39,50	76,18	38,14	75,13	38,00	74,97
40	37,85	73,61	40,35	77,44	39,40	76,50	38,30	75,55	38,10	75,20
<b>Méd.</b>	<b>38,83</b>	<b>74,43</b>	<b>39,71</b>	<b>76,27</b>	<b>38,93</b>	<b>75,15</b>	<b>37,78</b>	<b>75,09</b>	<b>37,80</b>	<b>74,66</b>

Avaliando também a localização da troca de espaçamento entre emissores e a perda de carga acumulada até este ponto, verificou-se que com o modelo desenvolvido no software GAMS<sup>®</sup>, obteve-se um maior comprimento do primeiro trecho, com representatividade média de 45% do total da linha (Tabela 8). Já para o software desenvolvido em Delphi<sup>®</sup> ficou em 20,04% com a utilização do CALC-1cm, por outro lado, com a utilização CALC-5cm a representatividade média do primeiro trecho foi de 30,26% (Tabela 11).

Comparando-se a perda de carga localizada no emissor em relação a perda de carga total percebeu-se que, em média, a perda de carga localizada no emissor representa menos de 0,6% da perda de carga total em todos os  $\Delta H$  (Tabela 15).

Tabela 15 – Perda de carga localizada em relação à perda de carga total, para as metodologias e variações de pressão estudadas.

$\Delta H$ (%)	GAMS <sup>®</sup> (%)		Delphi <sup>®</sup> (%)			Usual (%)	
	2		CALC-1cm	CALC-5cm	CALC-pré	1	
10	0,39		0,46	0,46	0,46	0,46	
15	0,40		0,48	0,47	0,47	0,47	
20	0,42		0,50	0,48	0,48	0,48	
25	0,43		0,51	0,52	0,48	0,48	
30	0,44		0,54	0,54	0,49	0,48	
35	0,46		0,56	0,54	0,49	0,49	
40	0,47		0,57	0,55	0,49	0,49	

Quanto à velocidade da água na mangueira gotejadora, obteve-se os menores valores para os menores  $\Delta H$ , com a menor velocidade média de  $0,25 \text{ m s}^{-1}$  (no modelo desenvolvido no GAMS<sup>®</sup>) e a maior de  $0,40 \text{ m s}^{-1}$  (no modelo desenvolvido no Delphi<sup>®</sup>, CALC-1cm) para as variações de pressão de 10 e 40%, respectivamente. Estes também tiveram as menores e maiores velocidades de entrada, com  $0,49$  e  $0,84 \text{ m s}^{-1}$ , respectivamente (Tabela 16). Estas diferenças são ocasionadas pela alteração no comprimento das linhas e consequentemente das vazões (Tabela 7, Tabela 10 e Tabela 13).

Tabela 16 - Velocidade média e velocidade de entrada na mangueira gotejadora, para as metodologias e variações de pressão estudadas.

$\Delta H$ (%)	GAMS <sup>®</sup>		Delphi <sup>®</sup>						Usual	
	2		CALC-1cm		CALC-5cm		CALC-pré		1	
	V méd. ( $\text{m s}^{-1}$ )	V ent. ( $\text{m s}^{-1}$ )	V méd. ( $\text{m s}^{-1}$ )	V ent. ( $\text{m s}^{-1}$ )	V méd. ( $\text{m s}^{-1}$ )	V ent. ( $\text{m s}^{-1}$ )	V méd. ( $\text{m s}^{-1}$ )	V ent. ( $\text{m s}^{-1}$ )	V méd. ( $\text{m s}^{-1}$ )	V ent. ( $\text{m s}^{-1}$ )
10	0,25	0,49	0,26	0,52	0,26	0,52	0,26	0,52	0,25	0,50
15	0,28	0,57	0,29	0,59	0,30	0,60	0,30	0,60	0,28	0,57
20	0,31	0,63	0,32	0,66	0,32	0,66	0,32	0,66	0,31	0,62
25	0,33	0,68	0,35	0,71	0,35	0,72	0,35	0,71	0,33	0,66
30	0,35	0,72	0,37	0,76	0,37	0,76	0,36	0,75	0,34	0,70
35	0,37	0,76	0,39	0,80	0,39	0,80	0,38	0,79	0,35	0,73
40	0,38	0,80	0,40	0,84	0,40	0,84	0,39	0,82	0,36	0,75

Verificou-se que os espaçamentos obtidos com o programa desenvolvido em Delphi<sup>®</sup> ficaram próximos a  $0,40 \text{ m}$ , já no modelo em GAMS<sup>®</sup> ficaram mais próximos a  $0,45 \text{ m}$ , sendo que o primeiro trecho apresentou espaçamento maior que o segundo.



Isto ocorreu devido à pressão de entrada na linha ser maior, e consequentemente a vazão do emissor também, o que possibilita a utilização de espaçamentos maiores com manutenção da vazão por metro linear. Já no segundo trecho, com a diminuição da pressão pela perda de carga, e pela utilização de um  $\Delta H$  maior, há uma diminuição da vazão nos emissores e, consequentemente, uma redução do espaçamento entre eles (Tabela 17 e Tabela 18).

Tabela 17 – Espaçamentos por trecho, gotejadores por trecho, comprimento por trecho, e comprimento total, para todas as formas de cálculo e variação de pressão de 20%.

Soft.	Nº de esp.	Espaçamento		Nº de gotejadores		L		
		Inicial	Final	Inicial	Final	Inicial	Final	Total
GAMS®	2	0,470	0,444	144	190	67,68	84,36	152,04
	CALC-1cm	0,420	0,380	61	289	25,62	109,82	135,44
Delphi®	CALC-5cm	0,400	0,400		350		140	140,00
	CALC-pré		0,40		350		140	140,00
Usual	1		0,40		327		130,8	130,80

Tabela 18 – Espaçamentos por trecho, gotejadores por trecho, comprimento por trecho, e comprimento total, para todas as formas de cálculo e variação de pressão de 40%.

Soft.	Nº de esp.	Espaçamento		Nº de gotejadores		L		
		Inicial	Final	Inicial	Final	Inicial	Final	Total
GAMS®	2	0,446	0,391	201	268	89,646	104,788	194,43
	CALC-1cm	0,420	0,330	87	409	36,54	134,97	171,51
Delphi	CALC-5cm	0,400	0,350	93	402	37,2	140,7	177,90
	CALC-pré		0,40		483		193,2	193,20
Usual	1		0,40		420		168	168,00

Em todos os cálculos realizados nos diferentes métodos, verificou-se que os dados estão de acordo com a relação estabelecida pela equação 3 proposta por Wu e Yue (1993) citados por Barreto Filho *et al.* (2000), em que para o  $\Delta H$  de 20 e 40% obteve-se  $\Delta q$  próximos a 10 e 22%, respectivamente, como pode ser observado nas Tabela 19 e Tabela 20.

Tabela 19 - Dados de número de espaçamentos, vazão (Q), uniformidade de distribuição (UD), uniformidade de emissão (UE), variação de vazão por metro linear ( $\Delta q_l$ ) e variação de vazão entre emissores ( $\Delta q$ ), obtidos para os métodos estudados e  $\Delta H$  20%.

Soft.	Nº de esp.	L (m)	Q (L.h <sup>-1</sup> )	UD (%)	UE (%)	$\Delta q_l$ (%)	$\Delta q$ (%)
GAMS <sup>®</sup>	2	152,04	454,07	96,98%	92,58	8,71%	10,87%
	CALC-1cm	135,44	475,27	97,09%	92,69	9,47%	10,64%
Delphi	CALC-5cm	140,00	475,80	96,98%	92,58	10,73%	10,73%
	CALC-pré	140,00	475,80	96,98%	92,58	10,73%	10,73%
Usual	1	130,80	450,02	97,50%	93,09	9,02%	9,02%

Tabela 20 - Dados de número de espaçamentos, vazão (Q), uniformidade de distribuição (UD), uniformidade de emissão (UE), variação de vazão por metro linear ( $\Delta q_l$ ) e variação de vazão entre emissores ( $\Delta q$ ), obtidos para os métodos estudados e  $\Delta H$  40%.

Soft.	Nº de esp.	L (m)	Q (L.h <sup>-1</sup> )	UD (%)	UE (%)	$\Delta q_l$ (%)	$\Delta q$ (%)
GAMS <sup>®</sup>	2	194,43	575,68	93,04	88,72	18,40	22,82
	CALC-1cm	171,51	606,90	93,30	89,00	21,36	22,71
Delphi <sup>®</sup>	CALC-5cm	177,90	607,27	93,08	88,77	13,65	22,83
	CALC-pré	193,20	594,31	92,79	88,51	22,88	22,88
Usual	1	168,00	543,12	95,04	90,69	16,72	16,72

Para o método de cálculo usual, devido ao fato de utilizar os mesmos dados de entrada que o realizado no modelo desenvolvido no Delphi<sup>®</sup> com utilização de um espaçamento, esperava-se a obtenção de resultados próximos, fato que não ocorreu pelo subdimensionamento da linha lateral no método usual. Isto gerou uma diferença no comprimento de 25,2 m para o  $\Delta H$  de 40%.

Ao analisar os resultados dos cálculos realizados pelos modelos considerando a uniformidade de distribuição, uniformidade de emissão, a variação de vazão e o comprimento da linha percebeu-se que a utilização da variação de pressão de 40% traria vantagens frente à de 20%. Isso pode ser verificado nas Tabela 19 e Tabela 20, pois mesmo tendo a menor uniformidade de distribuição e a maior variação de vazão dos emissores, ambas se mantêm dentro dos limites propostos por Wu (1997).

Verificou-se que os resultados encontrados pelos diferentes métodos de cálculos e um mesmo  $\Delta H$  encontram-se próximos (Tabela 17, Tabela 18, Tabela 19 e Tabela 20), sendo que o método de cálculo, no modelo GAMS<sup>®</sup>, foi o que apresentou o maior

comprimento ficando 14% superior ao método usual. Ao observar-se a UD encontrou-se uma diferença de 2% ( $\Delta H$  de 40%) e 0,52% ( $\Delta H$  de 20%), comparando-se a diferença na UE verifica-se que ficou próxima a UD, em 1,97% ( $\Delta H$  de 40%) e 0,5% ( $\Delta H$  de 20%). A variação de vazão por metro linear teve uma diferença de 0,31% ( $\Delta H$  de 20%) e 1,68% ( $\Delta H$  de 40%) em relação ao usual.

A menor variação de vazão por metro linear foi encontrada no modelo desenvolvido no GAMS<sup>®</sup>, com  $\Delta H$  de 20%. Comparando os cálculos realizados no modelo desenvolvido no Delphi<sup>®</sup> verificou-se que as variações de vazão por metro linear para o  $\Delta H$  de 20% ficaram entre 9,47 e 10,73%, respectivamente, para o cálculo com variação de 1 cm e pré-estabelecido, os quais para o  $\Delta H$  de 40% ficaram entre 21,36 e 22,88%.

Analisando as variações de vazão por metro linear nas Tabela 19 e Tabela 20, o comprimento das linhas e o número de emissores nas Tabela 17 e Tabela 18, verificou-se que o maior comprimento de linha lateral foi obtido no modelo desenvolvido no GAMS<sup>®</sup>, para todas as variações de pressão calculadas. Além disso, percebeu-se que apesar desse modelo alcançar maior comprimento, isso não representou aumento no número de emissores comparado ao Delphi<sup>®</sup>, pois o espaçamento indicado pelo primeiro foi maior em ambos os trechos, ocasionando uma redução de aproximadamente 5% no número de emissores.

A utilização da maior variação de pressão resultou em maiores comprimentos da linha lateral e mesmo assim mantém padrões aceitáveis de uniformidade. Percebeu-se também que a adoção de dois espaçamentos propiciou vantagens perante o único quando se considerou o modelo GAMS<sup>®</sup>, que foi desenvolvido para otimizar o dimensionamento da linha.

A adoção do modelo desenvolvido em GAMS<sup>®</sup> apresentou melhores resultados em relação aos demais, visto que, gerou um ganho no comprimento da linha, manteve a uniformidade e a variação de vazão, reduziu o número de emissores e apresenta menor  $\Delta q_l$  em todos os  $\Delta H$ .

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Após as avaliações realizadas, comparando o uso de diferentes métodos de dimensionamento de linhas laterais para sistema de irrigação por gotejamento, com espaçamento único e duplo, visando verificar a possibilidade de aumentar o tamanho da linha lateral, de forma a reduzir os custos de instalação, pode-se destacar as seguintes considerações:

1. A vazão média dos emissores está localizada entre 36,39 e 40,35% do início da linha, ponto em que a perda de carga acumulada variou de 73,25 e 78,01% do total, estando próximos aos valores citados na bibliografia.
2. Os espaçamentos obtidos nos cálculos com o modelo em Delphi<sup>®</sup> ficaram próximos a 0,40 m, já para o modelo em GAMS<sup>®</sup> ficaram próximos a 0,45m.
3. Em todos os cálculos o primeiro trecho apresentou espaçamento maior que o segundo e a média da perda de carga localizada no emissor representou menos de 0,6% da perda de carga total e a velocidade de entrada da água na mangueira ficou entre 0,49 e 0,84 m s<sup>-1</sup> em todos os  $\Delta H$ .
4. Ao comparar os resultados obtidos por todos os métodos, no que diz respeito a adoção de espaçamento duplo, verificou-se um aumento da vazão por metro linear no segundo trecho (maior) da linha lateral. Também se observou que o modelo desenvolvido no GAMS<sup>®</sup> apontou maior comprimento de linha em todos os  $\Delta H$  com a utilização de dois espaçamentos distintos.

5. Ao analisar-se o ponto de troca dos espaçamentos verificou-se que no modelo desenvolvido no GAMS<sup>®</sup> o primeiro trecho representa em torno de 45% do comprimento total, e a perda de carga na linha ficou próxima a 81% em todas as análises. Para o software criado no Delphi<sup>®</sup>, o comprimento do primeiro trecho correspondeu a aproximadamente 20% do comprimento total da linha, e até este ponto, utilizando os espaçamentos calculados com variação de 1 cm, a perda de carga na linha variou de 42 a 51% do total.

6. Após a sistematização dos resultados obtidos pelo método usual, passo a passo no Excel<sup>®</sup>, percebeu-se que este subdimensionou o comprimento da linha lateral, pois o cálculo generalizado adotado no dimensionamento usual não utilizou toda variação de pressão permitida nos dados de entrada.

7. Todos os modelos alcançaram melhores resultados com a utilização da variação de pressão de 40%, na qual verificou-se um aumento significativo no que diz respeito ao comprimento da linha lateral. Com relação à uniformidade de distribuição e a variação de vazão, embora tenham sido afetadas com o aumento da variação de pressão, se mantiveram dentro de padrões aceitáveis, tendo como base a bibliografia consultada.

8. Quando se analisou o emprego de um ou dois espaçamentos e o uso dos diferentes métodos de cálculo, percebeu-se que a adoção do modelo desenvolvido em GAMS<sup>®</sup>, com emprego de dois espaçamentos e  $\Delta H$  de 40% levou ao maior comprimento de linha lateral.

## 6 CONCLUSÕES

Ao considerar os modelos adotados, percebeu-se que o modelo de otimização desenvolvido em GAMS<sup>®</sup> apresentou os melhores resultados, o que tornou possível a indicação de sua utilização. Já o DiLLIG - Dimensionamento da linha lateral para irrigação por gotejamento desenvolvido no Delphi<sup>®</sup>, que demonstrou ser de fácil manipulação, apresentou resultados confiáveis, porém não ótimos, ou seja, dentro do universo de possibilidades para resolução do problema o modelo apresentou uma solução, a qual não era a melhor. Por outro lado, o método usual foi o que apresentou os menores resultados em relação ao comprimento da linha lateral, visto que subdimensionou o sistema ao não utilizar toda a variação de pressão admissível.

Diferente do adotado por Andrade (2009), a realização deste estudo permitiu observar que o ponto ideal para realização da troca dos espaçamentos encontra-se próximo a 45% do início da linha lateral.

A utilização da maior variação de vazão, desde que essa fique em padrões aceitáveis de uniformidade, garante os melhores resultados.

Com a adoção de espaçamento duplo verificou-se ser possível obter linhas com comprimentos maiores e um aumento da vazão por metro linear no segundo trecho, com pequenas diferenças na uniformidade de distribuição e variação de vazão.

Com isso, é possível dizer que a hipótese inicial de que a adoção de espaçamento duplo aumentaria o comprimento da linha lateral foi confirmada.

## 7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALLEN, R. G. Relating the Hazen-Williams and Darcy-Weisbach friction loss equations for pressurized irrigation. **American Society of Agricultural Engineers**, St Joseph, v. 12, n. 6, p. 685-693, 1996. Disponível em: <<http://asae.frymulti.com/abstract.asp?adid=25699&t=3>>. Acesso em: 20 jan. 2012.

ALVES, P. R. V.; PORTO, R. M. Coeficiente geométrico para estimativa da perda de carga localizada em linhas laterais de irrigação por gotejamento. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 22, n. 1, p. 51-59, 2002.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (Brasil). **Disponibilidade e demandas de recursos hídricos no Brasil**. Brasília, DF, 2007. 126 p.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (Brasil). **Águas Brasil**: informativo da Agência Nacional de Águas - Edição comemorativa 10 Anos. Brasília, DF, 2011. 24 p.

ANDRADE, L. A. D. **Estudo de uniformidade de emissão de água utilizando diferentes espaçamentos entre gotejadores na linha lateral**. 2009. 87 f. Tese (Doutorado em Agronomia/Irrigação e Drenagem) - Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista "Julio de Mesquita Filho", Botucatu, 2009.

BARRETO FILHO, A. D. A. et al. Desempenho de um sistema de irrigação por microaspersão, instalado a nível de campo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Jaboticabal, v. 4, n. 3, p. 309-314, 2000. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/rbeaa/v4n3/v4n3a01.pdf> >. Acesso em: 11 nov. 2011.

BASTOS, M. **Paradigmas da irrigação no Brasil**. Piracicaba: INCTEI, 2009. 3 p.

BENAMI, A.; OFEN, A. **Trickle irrigation**. Haifa: IESP, 1984. 257 p.

BERNARDO, S.; SOARES, A. A.; MANTOVANI, E. C. **Manual de irrigação**. 8. ed. Viçosa, MG: UFV, 2006. 625 p.

BRALTS, V. F. Operational principles: field performance and evaluation. In: NAKAYAMA, F. S. e BUCKS, D. A. (Ed.). **Trickle irrigation for crop production: design, operation, and management**. Amsterdam: Elsevier, 1986. p. 142-200.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Secretaria de Recursos Hídricos. Lei das Águas - Lei nº 9.433, de 8 de Janeiro de 1997. Recursos Hídricos – Conjunto de normas legais. Brasília, DF, 2004. p. 23-40.

BROOKE, A.; KENDRIK, D.; MEERAUS, A. **GAMS: sistema geral de modelagem algébrica**. São Paulo: Edgard Blucher, 1997. 278 p.

CLEMMENS, A. J.; SOLOMON, K. H. Estimation of Global Irrigation Distribution Uniformity. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, New York, v. 123, n. 6, p. 454-461, 1997.

COELHO, E. F.; COELHO FILHO, M. A.; OLIVEIRA, S. L. D. Agricultura irrigada: eficiência de irrigação e de uso de água. **Bahia Agrícola**, Salvador, v. 7, n. 1, p. 57-60, 2005.

DEMIR, V.; YURDEM, H.; DEGIRMENCIOGLU, A. Development of prediction models for friction losses in drip irrigation laterals equipped with integrated in-line and on-line emitters using dimensional analysis. **Biosystems Engineering**, London, v. 96, n. 4, p. 617-631, Apr. 2007.

FAO. **Água para alimentação, água para la vida: una evaluación exhaustiva de la gestión del agua en la agricultura**. Londres: Instituto Internacional del Manejo del Agua, 2007. 57 p.

FAVETTA, G. M.; BOTREL, T. A. Uniformidade de sistemas de irrigação localizada: validação de equações. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v. 58, n. 2, p. 427-730, 2001.

HARRY, J. B.; AMIN, M. S. Trickle irrigation lateral design on sloping fields. **Transactions of the ASAE - American Society of Agricultural Engineers**, St Joseph, v. 24, n. 4, p. 941-0944, 1981.

HATHOOT, H. M.; AL-AMOUD, A. I.; MOHAMMAD, F. S. Analysis and Design of Trickle-Irrigation Laterals. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, New York, v. 119, n. 5, p. 756-767, 1993.

HOWELL, T. A.; HILER, E. A. Trickle irrigation lateral design. **Transactions of the ASAE - American Society of Agricultural Engineers**, St Joseph, v. 17, p. 902-908, 1974.



- HOWELL, T. A. et al. Design and operation of trickle (drip) systems. In: JENSEN, M. E. (Ed.). **Design and operation of farm irrigation systems**. Michigan: American Society of Agricultural Engineers, 1983. p. 661-717.
- KANG, Y.; NISHIYAMA, S. Hydraulic Analysis of Microirrigation Submain Units. **Transactions of the ASAE - American Society of Agricultural Engineers**, St Joseph, v. 38, n. 5, p. 1377-1384, 1995.
- KELLER, J.; BLIESNER, R. D. **Sprinkle and trickle irrigation**. Caldwell: Blackburn Press, 1990. 652 p.
- KELLER, J.; KARMELI, D. Trickle Irrigation Design Parameters. **Transactions of the ASAE - American Society of Agricultural Engineers**, St Joseph, v. 17, n. 4 p. 678 - 684, 1974.
- MANTOVANI, E. C.; BERNARDO, S.; PALARETTI, L. F. **Irrigação: princípios e métodos**. 3. ed. Viçosa: UFV, 2009. 355 p.
- RETTORE NETO, O. et al. Perda de carga localizada em emissores não coaxiais integrados a tubos de polietileno. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 29, n. 1, p. 28-39, jan./mar. 2009.
- RONDÓN, E. O. O.; MURAKAMI, A. E.; SAKAGUTI, E. S. Modelagem computacional para produção e pesquisa em avicultura. **Revista Brasileira de Ciência Avícola**, Campinas, v. 4, p. 199-207, jan./abr. 2002.
- SAAD, J. C. C.; MARCUSSI, F. F. N. Distribuição da carga hidráulica em linhas de derivação otimizadas por programação linear. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 26, n. 2, p. 406-414, 2006. Disponível em: <[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0100-69162006000200008&nrm=iso](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-69162006000200008&nrm=iso)>. Acesso em: 17 out. 2011.
- SHIKLOMANOV, I. A. **World water resources: a new appraisal and assessment for the 21st Century**. Paris: UNESCO, 1998. 40 p.
- STYLES, S. W. et al. Accuracy of Global Microirrigation Distribution Uniformity Estimates. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, New York, v. 134, n. 3, p. 292-297, 2008.
- TALENS, J. A. M. **Riego localizado y fertirrigacion**. Madrid: Mundi-Prensa, 2002. 533 p.
- VIEIRA, D. B. **As técnicas de irrigação**. São Paulo: Globo, 1989. 263 p.
- WU, I. P. An assessment of hydraulic design of micro-irrigation systems. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 32, n. 3, p. 275-284, 1997.

WU, I. P. Energy gradient line approach for direct hydraulic calculation in drip irrigation design. **Irrigation Science**, Berlin, v. 13, n. 1, p. 21-29, 1992.

WU, I. P.; YUE, R. Drip lateral design using energy gradient line approach. **Transactions of the ASAE**, St Joseph, v. 36, n. 2, p. 389-394, 1993.

WU, P.; SARUWATARI, C. A.; GITLIN, H. M. Design of drip irrigation lateral length on uniform slopes. **Irrigation Science**, Berlin, v. 4, n. 2, p. 117-135, 1983.

YILDIRIM, G. Analytical relationships for designing multiple outlets pipelines. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, New York, v. 133, n. 2, p. 140-154, Mar./Apr. 2007.

## ANEXO 1

Modelo de programação não linear desenvolvido no GAMS®:

### sets

i /A/;

### scalars

\*D em mm

D Diâmetro da tubulação /16/

C Coeficiente de rugosidade /140/

vh variação de pressão /0.1/

\*H em m.c.a

H Pressão de entrada /10/

K Fator de proporcionalidade que caracteriza as dimensões do emissor /0.46297/

X Expoente de descarga do emissor que caracteriza o regime de fluxo /0.503/

### variables

L Comprimento da linha lateral (m),

T1 Comprimento do trecho 1 (m),

T2 Comprimento do trecho 1 (m),

Q1 Vazão do trecho 1,

Q2 Vazão do trecho 2,

QT Vazão total,

N1 Número de emissores no trecho 1,

N2 Número de emissores no trecho 2,

NT Número total de emissores,

SE1 Espaçamento entre emissores no trecho 1,

SE2 Espaçamento entre emissores no trecho 2,

VML11 Vazão por metro linear no trecho 1,

VML12 Vazão por metro linear no trecho 2,

HF1 Perda de carga ajustada trecho 1,

HF1A Perda de carga trecho 1,

HF2 Perda de carga ajustada trecho 2,

HF2A Perda de carga ajustada trecho 2,

VH1 Variação de pressão no trecho 1,

VH2 Variação de pressão no trecho 2,

F2 Fator de ajuste de Christiansen para o trecho 2,

FT Fator de ajuste de Christiansen para o comprimento total da linha,

Q1E Vazão do emissor de entrada da linha,  
 Q12 Vazão do emissor no ponto de troca dos espaçamentos,  
 Q2F Vazão do emissor do final da linha,  
 QMT1 Vazão média no trecho 1,  
 QMT2 Vazão média no trecho 2;

**Positive variables q1;**

Q1.lo = 1/3600/1000;  
 Q1.up = 1000/3600/1000;  
 Q2.lo = 1/3600/1000;  
 Q2.up = 1000/3600/1000;  
 t1.lo = 1;  
 t1.up = 10000;  
 t2.lo = 1;  
 t2.up = 10000;  
 nt.lo = 1;  
 nt.up = 10000;  
 nt.lo = 1;  
 nt.up = 10000;  
 n1.lo=1;  
 n1.up=10000;  
 n2.lo=1;  
 n2.up=10000;  
 se1.lo=0.1;  
 se1.up=0.5;  
 se2.lo=0.1;  
 se2.up=0.5;  
 vml11.lo= 3/3600/1000;  
 vml11.up= 5/3600/1000;  
 vml12.lo= 3/3600/1000;  
 vml12.up= 5/3600/1000;

**equations**

nL, nhf1, nhf2, nvht,nf2, nft, nt1,nt2, nqt,nq1e, nq12, nq2f, nqmt1  
 nqmt2, nn1, nn2, nnt, nvml11, nvml12, rt1, rt2, rt3, rt4;

\*comprimento total

nL.. L =E= t1+t2;

\*cálculo da perda de carga considerando a variação de pressão admissível

nhf1.. hf1a=E= ((H)\*vh1);

nhf2.. hf2a=E= ((H)\*vh2);  
 nvht.. vh =E= vh1+vh2;  
 nf2.. f2=E= (1/3)+(1/(2\*n2))+(1/(6\*(n2\*\*2)));  
 nft.. Ft=E=(1/3)+(1/(2\*nt)) +(1/(1\*(6\*(nt\*\*2))));  
 \* comprimento por trecho  
 nt1.. hf1=E= (10.646\*(((Q1+Q2)\*\*1.85)/(C\*\*1.85))\*((t1+t2)/((D/1000)\*\*4.87))\*Ft)-  
 (((10.646\*(Q2\*\*1.85)\*t2\*f2)/((C\*\*1.85)\*(D/1000)\*\*4.87)));  
 nt2.. hf2=E=(((10.646\*(Q2\*\*1.85)\*t2\*f2)/((C\*\*1.85)\*(D/1000)\*\*4.87)));  
 \*restrições  
 rt3.. hf1=E= hf1a;  
 rt4.. hf2=E= hf2a;  
 \* vazão total  
 nqt.. Qt =E= Q1 + Q2 ;  
 \* vazão do emissor  
 \*início da linha  
 nq1e.. q1e =E= k\*(H\*\*X);  
 \*ponto de transição entre espaçamentos  
 nq12.. q12 =E= k\*((H-hf1)\*\*X);  
 \*final da linha  
 nq2f.. q2f=E= k\*((H-(hf1+hf2))\*\*X);  
 \*vazão média dos gotejadores no trecho 1  
 nqmt1.. qmt1 =E= ((q1e+q12)/2);  
 \*vazão média dos gotejadores no trecho 2  
 nqmt2.. qmt2 =E= ((q12+q2f)/2);  
 \*número de gotejadores no trecho 1  
 nn1.. n1 =E= t1/se1;  
 \*número de gotejadores no trecho 2  
 nn2.. n2 =E= t2/se2;  
 nnt.. nt =E= n1+n2;  
 \*vazão metro linear no trecho 1  
 nvml11.. vml11 =E= (qmt1\*n1/t1)/1000/3600;  
 \*vazão metro linear no trecho 2  
 nvml12.. vml12 =E= (qmt2\*n2/t2)/1000/3600;  
 \*restrições referente a vazão por metro linear  
 rt1.. Q1/t1 =E= vml11 ;  
 rt2.. Q2/t2 =E= vml12 ;  
 model teste2 /all/;

solve teste2 using nlp maximizing L;

solve teste2 using nlp maximizing L;

## ANEXO 2

Solução do programa para a variação de pressão de 20%:

### S O L V E S U M M A R Y

MODEL esp.            OBJECTIVE L  
 TYPE NLP            DIRECTION MAXIMIZE  
 SOLVER CONOPT        FROM LINE 118

\*\*\*\* SOLVER STATUS    1 Normal Completion  
 \*\*\*\* MODEL STATUS    2 Locally Optimal  
 \*\*\*\* OBJECTIVE VALUE        152.2027

RESOURCE USAGE, LIMIT    0.000    1000.000  
 ITERATION COUNT, LIMIT    4    2000000000  
 EVALUATION ERRORS        0        0  
 CONOPT 3        Jul 14, 2011 23.7.3 WEX 27723.27726 WEI x86\_64/MS Windows

C O N O P T 3    version 3.15A  
 Copyright (C) ARKI Consulting and Development A/S  
                   Bagsvaerdvej 246 A  
                   DK-2880 Bagsvaerd, Denmark

The model has 26 variables and 23 constraints  
 with 66 Jacobian elements, 28 of which are nonlinear.  
 The Hessian of the Lagrangian has 10 elements on the diagonal,  
 20 elements below the diagonal, and 15 nonlinear variables.

\*\* Optimal solution. Reduced gradient less than tolerance.

CONOPT time Total                    0.001 seconds  
 of which: Function evaluations        0.000 = 0.0%  
           1st Derivative evaluations    0.000 = 0.0%

	LOWER	LEVEL	UPPER	MARGINAL
---- EQU nL	.	.	.	1.000
---- EQU nhf1	.	.	.	26.754
---- EQU nhf2	.	.	.	26.754
---- EQU nvht	-0.200	-0.200	-0.200	-267.543
---- EQU nf2	0.333	0.333	0.333	-0.008
---- EQU nft	0.333	0.333	0.333	-159.740
---- EQU nt1	.	.	.	-26.743
---- EQU nt2	.	.	.	-26.750
---- EQU nqt	.	.	.	EPS

---- EQU nq1e	1.474	1.474	1.474	-0.037
---- EQU nq12	.	.	.	-0.088
---- EQU nq2f	.	.	.	-0.051
---- EQU nqmt1	.	.	.	-0.073
---- EQU nqmt2	.	.	.	-0.102
---- EQU nn1	.	.	.	EPS
---- EQU nn2	.	.	.	EPS
---- EQU nnt	.	.	.	7.1703E-4
---- EQU nvml11	.	.	.	-1.240E+5
---- EQU nvml12	.	.	.	-1.635E+5
---- EQU rt1	.	.	.	-5.287E+7
---- EQU rt2	.	.	.	-6.587E+7
---- EQU rt3	.	.	.	26.754
---- EQU rt4	.	.	.	26.754
	LOWER	LEVEL	UPPER	MARGINAL
---- VAR L	-INF	152.203	+INF	.
---- VAR T1	1.000	67.771	10000.000	.
---- VAR T2	1.000	84.431	10000.000	.
---- VAR Q1	2.7778E-7	5.6476E-5	2.7778E-4	.
---- VAR Q2	2.7778E-7	7.0359E-5	2.7778E-4	.
---- VAR QT	-INF	1.2684E-4	+INF	.
---- VAR N1	1.000	144.066	10000.000	1.082E-10
---- VAR N2	1.000	190.018	10000.000	.
---- VAR NT	1.000	334.085	10000.000	.
---- VAR SE1	0.100	0.470	0.500	.
---- VAR SE2	0.100	0.444	0.500	.
---- VAR VML11	8.3333E-7	8.3333E-7	1.3889E-6	-5.275E+7
---- VAR VML12	8.3333E-7	8.3333E-7	1.3889E-6	-6.571E+7
---- VAR HF1	-INF	1.626	+INF	.
---- VAR HF1A	-INF	1.626	+INF	.
---- VAR HF2	-INF	0.374	+INF	.
---- VAR HF2A	-INF	0.374	+INF	.
---- VAR VH1	-INF	0.163	+INF	.
---- VAR VH2	-INF	0.037	+INF	.
---- VAR F2	-INF	0.336	+INF	.
---- VAR FT	-INF	0.335	+INF	.
---- VAR Q1E	-INF	1.474	+INF	.
---- VAR Q12	-INF	1.348	+INF	.
---- VAR Q2F	-INF	1.318	+INF	.
---- VAR QMT1	-INF	1.411	+INF	.
---- VAR QMT2	-INF	1.333	+INF	.

L Comprimento da linha lateral (m)

T1 Comprimento do trecho 1 (m)

T2 Comprimento do trecho 1 (m)

Q1 Vazão do trecho 1



Q2 Vazão do trecho 2  
QT Vazão total  
N1 Número de emissores no trecho 1  
N2 Número de emissores no trecho 2  
NT Número total de emissores  
SE1 Espaçamento entre emissores no trecho 1  
SE2 Espaçamento entre emissores no trecho 2  
VML11 Vazão por metro linear no trecho 1  
VML12 Vazão por metro linear no trecho 2  
HF1 Perda de carga ajustada trecho 1  
HF1A Perda de carga trecho 1  
HF2 Perda de carga ajustada trecho 2  
HF2A Perda de carga ajustada trecho 2  
VH1 Variação de pressão no trecho 1  
VH2 Variação de pressão no trecho 2  
F2 Fator de ajuste de Christiansen para o trecho 2  
FT Fator de ajuste de Christiansen para o comprimento total da linha  
Q1E Vazão do emissor de entrada da linha  
Q12 Vazão do emissor no ponto de troca dos espaçamentos  
Q2F Vazão do emissor do final da linha  
QMT1 Vazão média no trecho 1  
QMT2 Vazão média no trecho 2

\*\*\*\* REPORT SUMMARY : 0 NONOPT  
0 INFEASIBLE  
0 UNBOUNDED  
0 ERRORS

EXECUTION TIME = 0.015 SECONDS 2 Mb WEX237-237 Aug 23, 2011

USER: GAMS Development Corporation, Washington, DC G871201/0000CA-ANY  
Free Demo, 202-342-0180, sales@gams.com, www.gams.com DC0000

\*\*\*\* FILE SUMMARY