

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS - EESC

RAUL BORTOLOTTO GHIZZI

Sistema automatizado de irrigação residencial com reciclagem de águas pluviais

São Carlos
2016

RAUL BORTOLOTTO GHIZZI

Sistema automatizado de irrigação residencial com reciclagem de águas pluviais

Trabalho de conclusão de curso apresentado à Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do título de Engenheiro Mecatrônico.

Área de Concentração:
Automação

Orientador: Prof. Dr. Glauco A. P. Caurin.

São Carlos

2016

AUTORIZO A REPRODUÇÃO E DIVULGAÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

FICHA CATALOGRÁFICA

FOLHA DE AVALIAÇÃO

Candidato: Raul Bortolotto Ghizzi

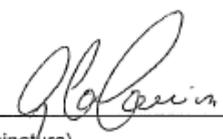
Título: Sistema automatizado de irrigação residencial com reciclagem de águas pluviais

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Escola de Engenharia de São Carlos da
Universidade de São Paulo
Curso de Engenharia Mecatrônica.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Glauco Augusto de Paula Caurin - Orientador

Nota atribuída: Sete e três (7,3)


(assinatura)

Engenheiro Gustavo José Giardini Lahr

Nota atribuída: Sete e três (7,3)


(assinatura)

Prof. Dr. Leonardo Marquez Pedro

Nota atribuída: Sete e três (7,3)


(assinatura)

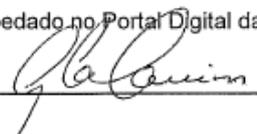
Média: Sete e três (7,3)

Resultado: Aprovado

Data: 30/09/2016

Este trabalho tem condições de ser hospedado no Portal Digital da Biblioteca da EESC

SIM NÃO Visto do orientador



“Only if we give it away, can love be love”

Ziggy Marley

RESUMO

GHIZZI, R. B. Sistema automatizado de irrigação residencial com reciclagem de águas pluviais – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2016.

Este trabalho propõe, por meio de simulações computacionais e pesquisa bibliográfica, um sistema automatizado de irrigação para um jardim residencial, com o objetivo de otimizar o consumo de água. A otimização do consumo se dá em duas frentes, primeiramente com a sensorização do sistema para evitar sua ativação em situações onde a irrigação não se faz necessária e, em segundo plano, com a reciclagem de águas pluviais. Sensores de umidade no solo coletam as taxas de umidade ao longo do terreno a ser irrigado, garantindo que solos com diferentes índices de drenagem sejam irrigados somente quando necessário. O sistema de controle acessa diariamente a previsão do tempo e, com base nela, determina a necessidade ou não de irrigação, evitando gastos desnecessários de água em estações chuvosas; um sensor de chuva atua como um feedback de segurança para casos onde o sistema possa falhar. Um sistema de coleta e armazenamento de água pluvial permite uma redução na demanda d'água na residência e um sistema de filtragem previne desgastes no sistema de irrigação devido a eventuais resíduos carregados pelo sistema de coleta. Por fim, o trabalho contempla possibilidades de aprofundamento e otimização nas frentes de pesquisa abordadas.

Palavras-chave: Sensor de umidade, Aspersão, Economia de água, Automação residencial.

ABSTRACT

GHIZZI, R. B. Automated residential irrigation system with pluvial water recycling – School of Engineering of Sao Carlos, University of Sao Carlos, Sao Carlos, 2016.

This work proposes, by computational simulations and bibliographic research, an automated irrigation system for a residential garden, with the goal of optimizing the water consumption. The optimization takes place in two main fronts, primarily with the sensorization of the system to avoid its activation in unnecessary situations where irrigation would not be necessary, and the second front being the recycling of pluvial waters. Humidity sensors collect the humidity levels along the area to be irrigated, making sure that soils with different drainage gradients are irrigated only when needed. The control system access the weather forecast daily, and based on that, he evaluates the necessity of irrigation, avoiding wastes on rainy seasons; a rain sensor acts as a security feedback for cases where the system might fail. A pluvial water collection and storage system would allow a reduction in the residence public water demand and a filtering system would prevent the wear of the irrigation system due to eventual sediments carried in by the collection system. Lastly, the work contemplates the possibility for future studies to optimize furthermore the system and deepen the knowledge in the related research fronts.

Key-words: Humidity sensor, Aspersion, Water saving, residential automation.

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	10
2.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	12
	2.1. Sistemas de controle	12
	2.2. Instrumentação.....	13
	2.2.1. Sensor de umidade.....	14
	2.2.2. Sensor de chuva.....	14
	2.2.3. Sensor de nível d'água	15
	2.3. Softwares	15
	2.3.1. MatLab©.....	16
	2.3.2. SolidWorks	16
	2.3.3. Microsoft Excel	16
	2.3.4. AutoCAD	16
	2.4. Perda de carga nas tubulações	16
	2.5. Irrigação por aspersão.....	17
	2.6. Irrigação Localizada.....	18
	2.5.1 Vantagens.....	18
	2.5.2 Desvantagens	18
	2.7 Tratamento da água para irrigação.....	19
	2.8 Dimensionamento da bomba hidráulica.....	19
	2.9 C# Linguagem de programação	20
3.	OBJETIVOS.....	20
4.	MATERIAIS E MÉTODOS	20
	4.1. Lógica de controle	20
	4.2 Algoritmo para aquisição de dados meteorológicos.....	23
	4.3 Modelagem matemática de um banco de dados.....	23
	4.4 Projeto Hidráulico	24
	4.4.3 Distribuição dos aspersores e tubulação.....	25
	4.4.4 Dimensionamento da bomba hidráulica	27
5.	RESULTADOS.....	28
	5.1 Modelo do banco de dados.....	28

5.1.1	Distribuição de chuvas ao longo do ano.....	28
5.1.2	Precisão das previsões	28
5.2	Sistema de controle.....	28
5.2.1	Flags de irrigação.....	29
5.2.3	Controle da Umidade	29
6.	APRIMORAMENTOS FUTUROS.....	30
6.1	Modelo matemático	31
6.2	Parâmetros do sistema.....	31
6.3	Sistema de tratamento da água.....	31
6.4	Sistema de irrigação.....	31
7.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	33
8.	APÊNDICES	35
8.1	APÊNDICE A - Planta irrigada.....	35
8.2	APÊNDICE B – Aba “Dados”	36
8.3	APÊNDICE C – Gráficos “Flag de Chuva”	37
8.4	APÊNDICE D – Gráficos “Comparação de <i>Flags</i> ”	39
8.5	APÊNDICE E – “ <i>Flags</i> de irrigação”	41

1. INTRODUÇÃO

Com o desenvolvimento e o crescimento das sociedades atuais, relacionado aos avanços tecnológicos na agricultura, se fez possível e necessário o aumento do uso de água para irrigação. Segundo o Ministério do Meio Ambiente (Ministério do Meio Ambiente, 2015) cerca de 70% do consumo de água no Brasil é voltado para agricultura e, devido ao montante de água utilizado, a eficiência da irrigação se torna um fator muito importante para o uso sustentável da mesma.

Estima-se que cerca de 55,0% da água destinada à irrigação se perde antes de atingir a zona radicular das culturas, devido às baixas eficiências na condução (15,0%), distribuição (15,0%) e aplicação (25,0%) dos sistemas utilizados (CHRISTOFIDIS, 2002). Em razão dessa baixa eficiência dos sistemas de irrigação convencionais se recomenda o uso de sistemas como a irrigação localizada e o pivô central (CARVALHO, 2004).

O uso de sistemas automatizados foi amplamente difundido para a irrigação em larga escala, onde a mão-de-obra intensiva necessária para irrigar grandes áreas motivou o estudo e implantação de técnicas mais eficientes. O uso de sistemas automatizados visando à redução do consumo na irrigação residencial ainda é um ramo em desenvolvimento.

O setor urbano é responsável por cerca de 20% do consumo de água no país (CARVALHO, 2004) e tem passado por situações de escassez nos últimos anos, situação que é agravada devido à distribuição dos recursos hídricos no território nacional. Segundo Chirstófídis (2002), cerca de 89% das águas superficiais estão concentradas nas regiões Norte e Centro-Oeste e 11% nas regiões Nordeste, Sul e Sudeste, as quais são responsáveis por 90,8% da demanda de água no país e concentram 85,5% da população. Em vista da situação de escassez, em alguns estados se faz necessária a otimização do consumo da água em todos os setores e a busca por alternativas como a reciclagem da água para reduzir a sobrecarga no sistema hídrico regional.

Os sistemas automatizados vão desde sistemas simples com mangueiras flexíveis de superfície e válvulas com timer, que abrem de tempo em tempo para irrigar, até sistemas mais complexos com linhas subterrâneas de alimentação, onde uma central de controle aciona válvulas solenoides com base em dados coletados por sensores.

O método mais empregado na irrigação residencial é a irrigação por aspersão, devido à sua alta eficiência, de 60% a 85% (MAROUELLI; SILVA, 1998), facilidade de instalação e grande área irrigada por aspensor.

Este trabalho apresenta inicialmente uma revisão bibliográfica dos assuntos fundamentais abordados na proposta do sistema, em seguida expõe as simulações e resultados obtidos nas mesmas e, por fim, propõe futuros trabalhos com a finalidade de aprofundar o conhecimento em áreas específicas envolvidas nesse projeto.

O objetivo da pesquisa é criar um modelo aberto para o desenvolvimento de sistemas residenciais de irrigação, buscando reduzir custos ao consumidor final e amenizar o impacto da irrigação ao meio ambiente.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Para a concepção de um sistema de irrigação automatizado se fez necessário o estudo e a integração de conceitos de diversas áreas do conhecimento, tais como computação, sistemas de controle e sensores, projeto hidráulico e agricultura.

2.1. Sistemas de controle

O objetivo de um sistema de controle é receber uma variável e controlá-la com base em uma dada referência. Existem dois tipos possíveis de malhas de controle: malha aberta ou malha fechada. Cada tipo de sistema é projetado de forma peculiar para atender aos requisitos do problema em questão e a escolha do tipo de malha depende das configurações do sistema.

Um sistema de malha aberta não mede o sinal de saída para compará-lo à referência e não é capaz de garantir que o valor está sendo controlado da forma desejada. A malha aberta é usada em sistemas onde as entradas e saídas são conhecidas, ou onde os distúrbios podem ser desprezados (OGATA, 2000). Um forno micro-ondas é um exemplo de sistema de malha aberta, pois a entrada do sistema é o tempo e a potência do aquecimento; porém, o sistema não verifica se o conteúdo foi devidamente aquecido, interrompendo seu funcionamento ao final do período programado ou com cancelamento manual por parte do usuário. Um esquema de malha aberta é mostrado na figura 1.

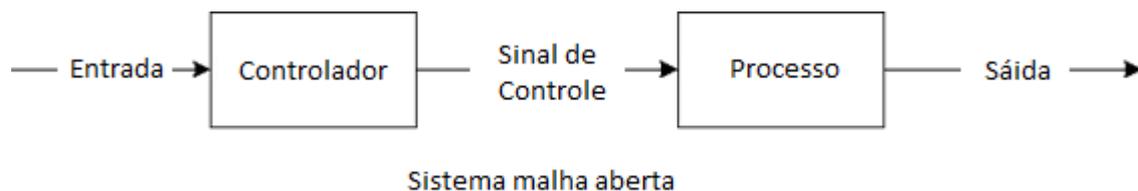


Figura 1: Sistema em Malha Aberta (Deste autor, 2016).

Quando as entradas do sistema são desconhecidas ou os distúrbios não podem ser desprezados é necessário utilizar um sistema de malha fechada, onde a saída do controlador é comparada com o valor de referência gerando o erro do sinal de controle. Sistemas de malha fechada diferem de sistemas de malha aberta principalmente pelo *feedback* que o controlador recebe dos sensores que medem a saída. Uma pessoa enchendo um copo de água no filtro é um exemplo de um sistema com malha fechada, a pessoa começa a colocar água no copo e usa a visão ou o tato como *feedback* para

determinar se o copo está cheio ou não. Um esquema simplificado de malha fechada está na figura 2.

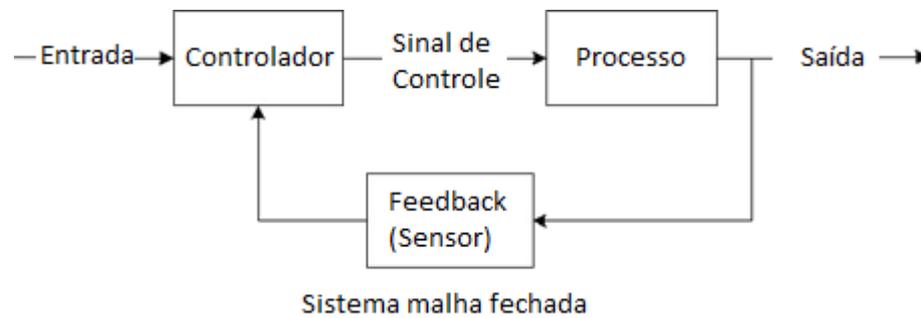


Figura 2: Sistema em Malha Fechada (Deste autor, 2016).

2.2. Instrumentação

Para que o sistema de controle atue da forma desejada, se faz necessária a realimentação do sistema com dados gerados nos sensores que monitoram as variáveis envolvidas, sensores de chuva e umidade.

2.2.1. Sensor de umidade

Sensores de umidade são dispositivos que medem a presença de moléculas de água em um meio, ar ou solos por exemplo. Existem diversos tipos de sensores de umidade: resistivos, capacitivos, ópticos, acústicos, sendo os sensores resistivos e capacitivos os mais comumente encontrados no mercado.

Os sensores resistivos, figura 3, medem a mudança da resistência do meio, usualmente entre dois eletrodos, associada à variação da umidade (ZAMBROZI JÚNIOR, 2005). Sensores capacitivos associam variações na constante dielétrica do meio às variações de umidade no mesmo (ZAMBROZI JÚNIOR, 2005).

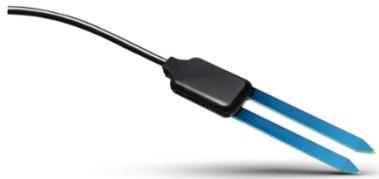


Figura 3: Sensor resistivo para medição de umidade do solo (DECAGON, 2016).

2.2.2. Sensor de chuva

Sensores de chuva são comuns na indústria automobilística e consistem de um sistema que verifica a presença ou não de água em uma dada superfície. Os sensores usados na indústria automobilística são dispositivos ópticos que medem a presença de chuva com base na distorção de feixes de luz causada pela mesma, a intensidade de luz refletida diminui com o aumento do volume de água. Os sensores mais simples, como o apresentado na figura 4, para automação consistem de uma placa condutora que detecta a presença de água em sua superfície com base nas propriedades elétricas da mesma.



Figura 4: Sensor de Chuva (FILIFELOP, 2016)

2.2.3. Sensor de nível de água

Sensores de nível de água consistem de um conjunto de sensores condutivos, como os observados na figura 5, que formam uma medida discreta do nível de água, um dispositivo emissor é colocado no nível de referência e receptores são colocados em níveis acima da referência. O nível de água é determinado com base em quais receptores estão dentro ou fora do líquido.

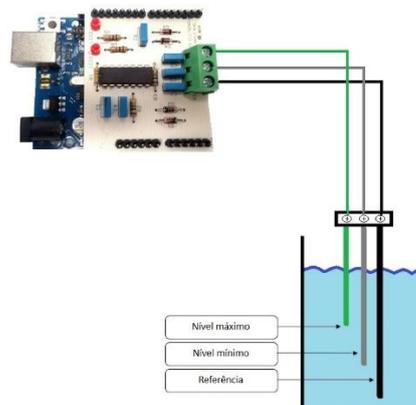


Figura 5: Sensor de nível d'água (FBSELETRONICA)

2.3. Softwares

Com base no modelo teórico o sistema foi projetado e simulado com auxílio de diversos softwares específicos de cada área envolvida, os quais são abordados neste item.

2.3.1. MatLab©

Uma ferramenta poderosa para solução e simulação de problemas de engenharia é o *software* MatLab da Math Works. MatLab utiliza uma linguagem de programação proprietária MATLAB, uma linguagem de quarta geração e desenvolvida para trabalhar com os mais diversos campos da engenharia, matemática e física. Ele possui bibliotecas dedicadas a áreas como estatística, visão computacional, simulação de fluidos, entre outras.

2.3.2. SolidWorks

SolidWorks é uma ferramenta *Computer-aided Design* (CAD) e *Computer-aided Engineering* (CAE) desenvolvida pela Dassault Systèmes. É um software amplamente utilizado por diversas áreas da engenharia para design e simulação de peças, componentes e os mais diversos produtos, que oferece pacotes específicos de simulação e design para certas áreas, como pacotes de simulação de fluidos e eletrônica.

2.3.3. Microsoft Excel

O Microsoft Excel é um editor de planilhas desenvolvido pela Microsoft como parte do pacote Microsoft Office. O Excel é amplamente utilizado para aplicações de engenharia, finanças e estatística. Seu grande diferencial se encontra na automação de planilhas; o software aceita a criação de macros utilizando a linguagem *Visual Basic for Applications* (VBA), que é baseada na linguagem Visual Basic, desenvolvida pela Microsoft. A interface oferece espaço para escrever e depurar códigos, possibilitando a implementação de métodos numéricos e sistemas automatizados que seriam muito complexos ou impossíveis de se conseguir com técnicas de manipulação de planilhas (MICROSOFT).

2.3.4 AutoCAD

O AutoCAD é uma ferramenta CAD para desenhos que representam duas dimensões (2D) e três dimensões (3D) desenvolvida pela AutoDesk. É a ferramenta CAD mais utilizada no mercado desde 1986 (AUTOCAD, 2016), nas mais diversas áreas da indústria, arquitetura, gerenciamento de projeto, engenharias, design gráfico, entre outras.

2.4. Perda de carga nas tubulações

O escoamento em tubos sempre está sujeito à resistência hidráulica e à dissipações de energia ao longo de seu comprimento (RETTORE NETO, 2011, p. 31). A perda de carga nas tubulações é um fator importante para projetos de engenharia de irrigação, pois afeta o custo total e o balanço hidráulico do sistema (KAMAND, 1988). A dissipação de energia,

representada pela perda de carga, pode ser calculada por diferentes equações encontradas na literatura básica da hidráulica (PORTO, 1998).

O equacionamento escolhido para este projeto foi o da equação de Hazen-Williams, comumente utilizada para projetos simples de irrigação (RETTORE NETO, 2011). A equação para unidades no S.I () é:

$$S = \frac{10,67 \times Q^{1,85}}{C^{1,85} \times d^{4,87}}$$

S – Perda de carga

Q – Vazão (m³/s)

C – Coeficiente de rugosidade

D – Diâmetro do tubo

2.5. Irrigação por aspersão

Nos sistemas de irrigação por aspersão a aplicação da água se faz pela divisão de um ou mais jatos de água em uma grande quantidade de pequenas gotas no ar, que caem sobre o solo na forma de uma chuva artificial. (BISCARO, 2009, p.15). A água sobre pressão é expelida pelos aspersores irrigando o terreno como um todo com uma lâmina d'água. Segundo Biscaro (2009) as principais vantagens desse método são:

- a) Não exigência de um processo de sistematização do terreno, adaptável a diferentes topografias.
- b) Maior área irrigável, a lâmina d'água cobre um raio ao redor do aspersor e, se projetado corretamente, não há perda de área.
- c) Não possui restrições quanto ao horário de aplicação, maior versatilidade e margem para controle.
- d) Não apresenta risco de erosão para o solo.

As desvantagens do sistema são:

- a) Custo inicial elevado.
- b) Efetividade da aplicação influenciada pelo vento.
- c) Perdas por evaporação no jato devido ao efeito de chuva artificial.
- d) Necessita de um sistema motobomba com potência elevada.

2.6. Irrigação Localizada

É o método de irrigação que aplica água diretamente na zona radicular das plantas, em pequena intensidade, porém com alta frequência (CARVALHO, 2004), de forma a manter um controle mais delicado e preciso da umidade do solo. A irrigação localizada se divide em duas frentes: gotejamento e microaspersão, dependendo do tipo de emissor utilizado.

O sistema de irrigação é fixo, possuindo dois tipos de linha, as linhas principais de alimentação (linhas de alta pressão) e as linhas laterais, que ramificam ao longo do terreno para alimentar os aspersores (linhas de baixa pressão), sendo que apenas um determinado número de linhas laterais funciona ao mesmo tempo, reduzindo a carga no sistema.

2.5.1 Vantagens

As principais vantagens da irrigação localizada, segundo Daker (1983), Bernardo (1995) e Vermeiren & Jobling (1997) são:

- a) Maior eficiência no uso da água: permite maior controle da lâmina d'água aplicada e reduz as perdas por evaporação, por percolação ou por escoamento superficial.
- b) Maior vitalidade nas plantas: para plantas que respondem positivamente à alta umidade no solo devido à alta frequência de irrigação.
- c) Adapta-se a diferentes tipos de solo: como a intensidade de irrigação é reduzida, o método se adapta melhor a diferentes tipos de solo.
- d) Automação: por meio do uso de sensores de umidade pode-se iniciar ou finalizar um ciclo de irrigação automaticamente.
- e) Redução dos gastos de energia: a pressão necessária para irrigação localizada é em geral igual a 50,0 – 70,0% da necessária para irrigação por aspersão clássica, permitindo a instalação de sistemas com menor potência.

2.5.2 Desvantagens

As principais desvantagens, segundo Daker (1983), Bernardo (1995) e Vermeiren & Jobling (1997) são:

- a) Entupimento: as saídas dos aspersores são pequenas, para baixa vazão, de forma que o sistema necessita que a água passe por uma filtragem fina para garantir uma qualidade mínima da mesma.
- b) Distribuição do sistema radicular: as raízes tendem a concentrar-se nas zonas úmidas irrigadas, diminuindo sua abrangência.

- c) Custo de aquisição: sistemas de irrigação localizada tendem a ter um custo de aquisição maior em relação a outros métodos de irrigação para os mesmos parâmetros de projeto.

2.7 Tratamento da água para irrigação

O sistema de irrigação estará associado a um sistema de coleta de águas pluviais, sendo assim necessário que essa água seja tratada para evitar entupimentos no sistema por deposição de poluentes carregados da atmosfera ou por particulados presentes no telhado e calhas.

Existem diversos elementos filtrantes para o sistema de filtragem, sendo utilizados principalmente os filtros de areia, tela e disco (PINTO, 2010). Os filtros de areia são mais recomendados para a remoção de contaminantes orgânicos e algas (TESTEZLAF, 2008).

Os filtros consistem, basicamente, de um recipiente cilíndrico onde fica o elemento filtrante. As características de cada filtro variam de acordo com a vazão máxima e o tamanho das partículas a serem filtradas. A manutenção dos filtros se dá através da retrolavagem, onde o fluxo da água no filtro é invertido de modo a carregar as partículas depositadas no mesmo com a água; a retrolavagem pode ser feita de forma manual ou automática, dependendo do sistema implantado, sendo mais comum a retrolavagem manual (PINTO, 2010).

2.8 Dimensionamento da bomba hidráulica

Os fatores técnicos a serem considerados para o dimensionamento da potência de bombas e motores para sistemas de irrigação são dependentes da altura manométrica (perda de carga ao longo do sistema), da vazão e do rendimento do conjunto motor-bomba (OLIVEIRA FILHO *et al*, 2010).

Para o sistema em questão será utilizada uma bomba cuja potência foi calculada utilizando a seguinte fórmula (OLIVEIRA FILHO *et al*, 2010):

$$P_{cv} = \frac{Q \times H}{270 \times \eta}$$

P_{cv} – Potência da bomba (cv)

Q – Vazão (m³.h⁻¹)

H – Altura manométrica (mca)

n – Eficiência da bomba hidráulica

2.9 C# Linguagem de programação

A C# é uma linguagem de programação orientada a objeto desenvolvida pela Microsoft como parte da sua iniciativa “.NET”. A escolha da C# para o projeto se deu em função da vasta gama de bibliotecas para acesso e manipulação de objetos em HTML, proporcionando um código mais simples de ser implementado. Seu uso se deu na aquisição de dados meteorológicos onde o sistema de controle acessa três sites distintos e o algoritmo busca em cada site a probabilidade de chuva para o dia em questão e a armazena em um log para ser usado pelo controlador.

3. OBJETIVOS

Esse trabalho busca propor um sistema de irrigação automatizado que reduz o consumo de água de uma casa evitando o acionamento desnecessário do sistema, coletando e reciclando águas pluviais e otimizando o sistema de irrigação. Para atingir tal objetivo as seguintes metas foram traçadas:

- Planejar e implementar no MatLab a lógica de controle do sistema de irrigação.
- Desenvolver em C# um programa para aquisição de dados meteorológicos.
- Modelagem matemática em MATLAB de um banco de dados fictício para simulação do sistema de controle.
- Projeto hidráulico para a irrigação de uma propriedade.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

Para tornar o sistema eficiente e inteligente foi desenvolvida uma lógica de controle que leva em consideração a previsão de chuva de três fontes distintas e grava em um banco de dados tais previsões a fim de ponderar a precisão e confiabilidade de cada uma.

4.1. Lógica de controle

As entradas do sistema de controle são as leituras dos sensores de umidade e chuva e os dados das previsões do tempo coletados. O sistema lê a umidade do solo para cada região do terreno e quando a umidade fica abaixo de um valor mínimo, o qual pode ser definido peculiarmente para cada região com base na flora da mesma, o sistema de controle é ativado para verificar a necessidade ou não de irrigação.

Para determinar se há necessidade de irrigação o sistema acessa 3 fontes diferentes (G1, Clima Tempo e CPTEC) de previsão meteorológica através de um algoritmo que retorna a probabilidade de chuva prevista por cada fonte. Com base nas três previsões o sistema julga se vai chover no dia em questão e avalia a necessidade de se irrigar o terreno; os cenários previstos são:

- No caso de previsão positiva de chuva o sistema entra em um estado de espera onde ele aguarda ao longo do dia a confirmação da previsão pelo sensor de chuva, caso a previsão esteja errada o sistema de irrigação é ativado no modo de irrigação noturna com um volume de água reduzido, uma vez que durante a noite as perdas por evaporação são menores, e caso se faça necessária a irrigação novamente o sistema será ativado no dia seguinte, permitindo que a umidade do solo se torne uniforme novamente.
- No caso de previsão negativa de chuva o sistema de irrigação é ativado na região em questão. O *flag* do sensor de chuva é mantido como um *feedback* de segurança para o sistema, interrompendo a rotina de irrigação no caso de imprecisão na previsão meteorológica.

A figura 6 apresenta o fluxograma do sistema de controle.

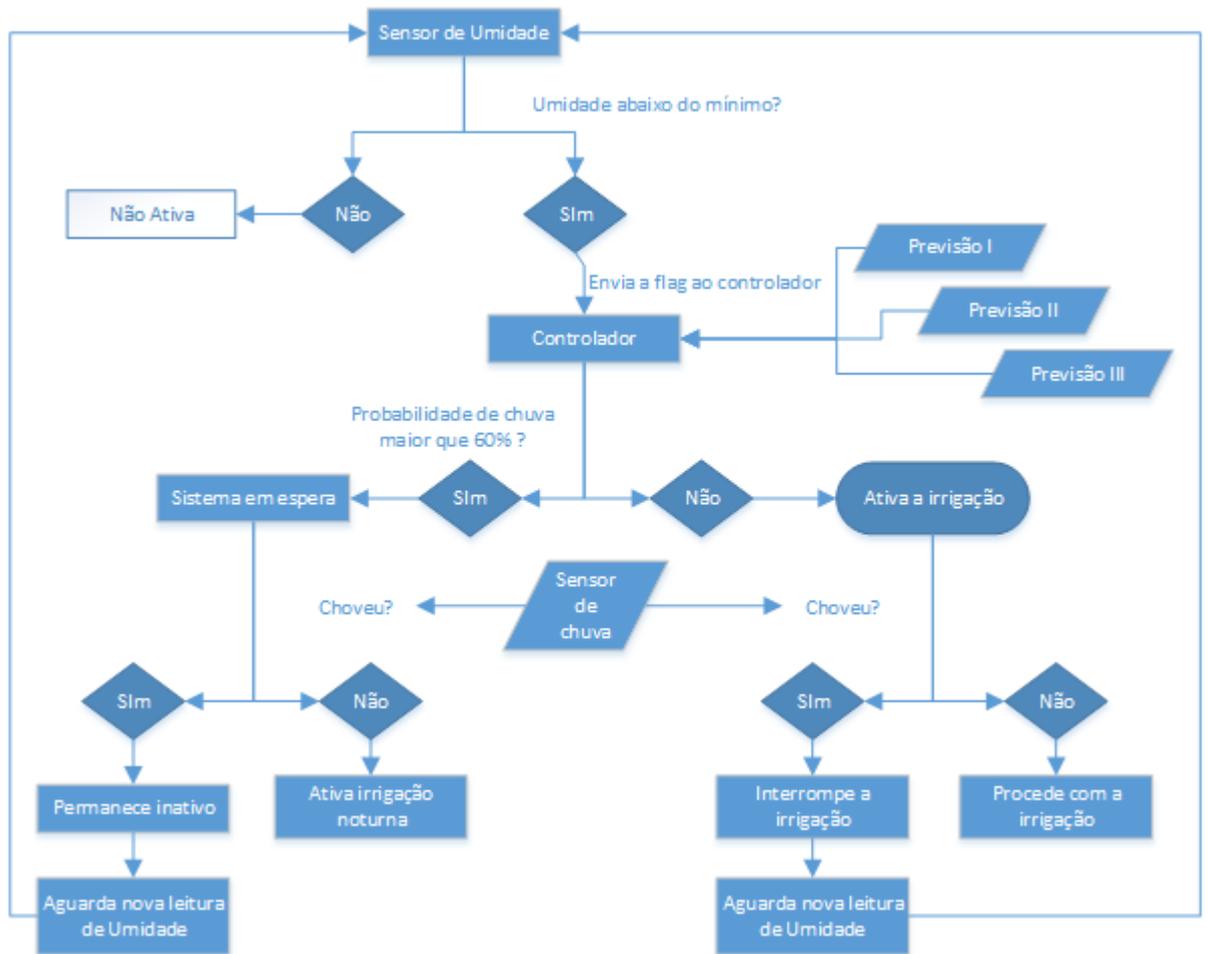


Figura 6: Fluxograma do sistema de controle (Deste autor, 2016)

Como parte do sistema, é implementado um banco de dados que armazena o histórico do sistema de controle (previsões, *flags* de irrigação e chuva, tomadas de decisão, entre outros), com o intuito de manter um relatório do funcionamento do sistema e possibilitar melhorias no mesmo. O banco de dados inicialmente é usado para gerar um fator de confiabilidade para cada fonte de previsão meteorológica; esse fator representa a porcentagem histórica de acertos da previsão para cada fonte e é levado em consideração na tomada de decisão do sistema quanto à necessidade de irrigação; o cálculo da probabilidade estimada de chuva pelo sistema é uma média ponderada das probabilidades de cada uma das fontes onde o peso de cada probabilidade é o fator de confiabilidade das respectivas fontes.

O fator de confiabilidade é a porcentagem histórica de acerto de cada fonte, o sistema coleta os dados meteorológicos e os compara com os dados dos sensores para conferir se a previsão foi correta ou não no dia em questão e em seguida armazena o resultado da comparação entre a previsão e a situação real.

4.2 Algoritmo para aquisição de dados meteorológicos

Para a aquisição das previsões meteorológicas foram implementados três algoritmos na linguagem C#, onde cada algoritmo gera um arquivo de texto com o valor da probabilidade de chuva prevista por cada fonte. O algoritmo gera um objeto que recebe o código HTML da página contendo a probabilidade de chuva e realiza uma busca no código pelos marcadores que acompanham o valor da probabilidade, uma vez identificado o valor é escrito em um arquivo do tipo .txt para ser acessado pelo controlador.

4.3 Modelagem matemática de um banco de dados

Uma parte fundamental para a simulação do controle são os dados coletados pelos sensores e o banco de dados gerado ao longo do funcionamento do sistema, como a coleta dos dados depende da implementação e funcionamento do sistema em situações reais foi implementado um modelo matemático a fim de gerar um banco de dados fictício para testar o funcionamento do sistema.

O modelo gira em torno da distribuição das chuvas ao longo do ano e das respectivas previsões do tempo.

Primeiramente, para cada ano é gerada uma curva de densidade de probabilidade seguindo uma distribuição normal, a qual é invertida e ajustada para que seus valores representem uma probabilidade entre 40% e 80% como a mostrada na figura 7. A finalidade da curva é ponderar maiores probabilidades de chuva para meses mais chuvosos e vice-versa.

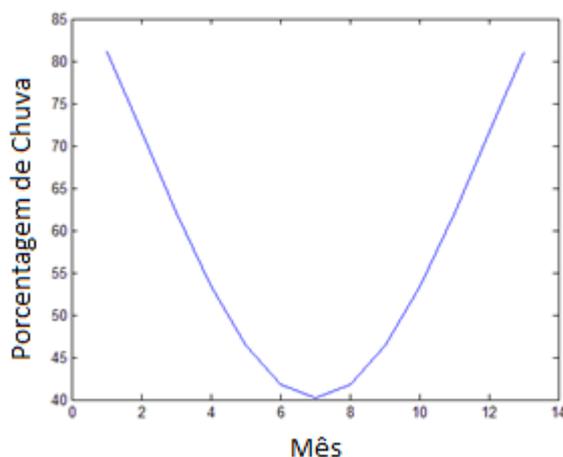


Figura 7: Curva densidade probabilidade (Deste autor, 2016)

Em seguida, para cada mês são gerados 3 vetores com 31 porcentagens aleatórias cada; para efeito de simulação não são relevantes anos bissextos ou números de dias variáveis em cada mês.

Para gerar as previsões meteorológicas de cada dia é feita uma ponderação entre o valor da distribuição normal para o mês em questão e as três porcentagens aleatórias geradas para o dia. As previsões são geradas a partir das seguintes fórmulas:

$$Prob.Chuva 1 = 0,3 \times dist.(mês) + 0,7 \times [(prob. 1 \times 0,4) + (prob. 2 \times 0,3) + (prob. 3 \times 0,3)]$$

$$Prob.Chuva 2 = 0,3 \times dist.(mês) + 0,7 \times [(prob. 1 \times 0,3) + (prob. 2 \times 0,4) + (prob. 3 \times 0,3)]$$

$$Prob.Chuva 3 = 0,3 \times dist.(mês) + 0,7 \times [(prob. 1 \times 0,3) + (prob. 2 \times 0,3) + (prob. 3 \times 0,4)]$$

Onde a variável *Prob.Chuva* é a probabilidade de chuva para cada uma das fontes, *dist.(mês)* é o valor da distribuição probabilística para o mês em questão e *prob. 1*, *prob. 2* e *prob. 3* são as respectivas porcentagens aleatórias geradas para cada dia. A finalidade da ponderação entre as três probabilidades aleatórias é garantir uma correlação entre as 3 previsões de modo que elas convirjam a valores próximos, uma vez que discrepâncias reais entre previsões não costumam apresentar variações muito grandes.

Para gerar a probabilidade “real” de chuva, se de fato choveu ou não no dia, é usada a seguinte fórmula:

$$Prob.Chuva 4 = 0,3 \times dist.(mês) + 0,7 \times \left[\frac{(prob. 1) + (prob. 2) + (prob. 3)}{3} \right]$$

A ponderação usando a média entre as três probabilidades aleatórias busca gerar uma probabilidade igualmente dependente das três previsões de modo a garantir que as previsões e a probabilidade real estejam relacionadas, simulando a precisão dos modelos meteorológicos atuais.

Por fim, são geradas as *flags* de chuva do sistema para todas as quatro probabilidades simuladas, se a probabilidade simulada é maior que 60%, a *flag* acusa chuva e guarda o valor 1 no banco de dados, caso contrário é armazenado o valor 0.

O valor de 60% foi estipulado por gerar distribuições de chuva mais próximas das reais.

4.4 Projeto Hidráulico

O projeto hidráulico consiste no planejamento da irrigação para uma dada propriedade e no dimensionamento da bomba hidráulica para suprir a demanda de pressão do sistema.

4.4.3 Distribuição dos aspersores e tubulação

Para o planejamento das áreas irrigadas foram utilizados como referência os aspersores da empresa Orbit representados nas figuras 8 e 9.



Figura 8: Aspersor Saturn IV (ORBIT, 2016).



Figura 9: Aspersor 4'' pop-up (ORBIT, 2016).

A planta do terreno irrigado, representada no apêndice A, apresenta os seguintes componentes:

- Tubulação de alta pressão (Ciano)
- Tubulação de baixa pressão (Amarelo)
- *Manifolds* (Vermelho)
- Bomba hidráulica (Verde)
- Cisterna para armazenamento d'água (Magenta)
- Raio de operação dos aspersores (Azul) com seus respectivos valores e ângulos de operação (Preto)

Para o projeto em questão foram utilizados 4 aspersores do tipo Saturn IV e 13 do tipo 4" pop-up, com diferentes raios e ângulos de operação. As especificações dos aspersores utilizados estão detalhadas na tabela 1. Os aspersores utilizados foram selecionados, dentre uma gama de materiais previamente adquiridos, de modo a cobrir toda a área irrigada utilizando um máximo de oito aspersores por *manifold*, segundo recomendação do fabricante (ORBIT).

Tipo	Quantidade	Raio de operação	Ângulo de operação	Vazão	Pressão de operação
Orbit	unidades	metros	Graus	L/min	Bar
Saturn 4	1	6	360	4.9	2.07
Saturn 4	1	8	360	8.3	2.07
Saturn 4	1	8	90	8.3	2.07
Saturn 4	1	9	360	9.4	2.07
4" pop-up	3	3.1	90	5.68	1.72
4" pop-up	10	3.1	180	5.68	1.72
Total	17				

Tabela 1: Especificações dos aspersores

A distribuição dos aspersores ao longo da propriedade foi feita de modo a cobrir toda a área verde a ser irrigada dentro da região de trabalho dos aspersores. A sobreposição parcial das regiões de trabalho dos aspersores foi escolhida em detrimento da sobreposição ponta-a-ponta (onde o aspersor seguinte é colocado no limite do raio de operação do aspersor anterior), com a finalidade de reduzir o custo inicial do projeto, diminuindo o número de aspersores empregados e, conseqüentemente, a potência necessária para atender o sistema, e de reduzir a vazão de água, ao empregar um número reduzido de aspersores, na busca de otimizar o processo de irrigação para reduzir o consumo final. A irrigação com um número reduzido de aspersores consome mais tempo, porém permite um controle mais preciso da umidade, a exemplo da irrigação localizada, ao irrigar com lâminas de água de menor volume, dado que a umidade no solo demora a se uniformizar após a irrigação.

Para reduzir a potência da bomba hidráulica necessária para atender o sistema, a propriedade foi dividida em quatro grandes áreas de irrigação, sendo cada área definida por suas linhas de alimentação; cada *manifold* alimenta duas áreas do terreno onde as duas primeiras saídas definem a primeira área e as duas últimas definem a segunda para cada *manifold*. A divisão do terreno se deu de modo que o sistema irrigue cada área em momentos diferentes reduzindo a pressão total de operação durante a irrigação. O controle

das regiões irrigadas se dá através de um *manifold* de válvulas solenóides, as quais são operadas eletronicamente pelo sistema de controle.

4.4.4 Dimensionamento da bomba hidráulica

Para o dimensionamento da bomba hidráulica necessária para atender a demanda de pressão do sistema foi criada um planilha no Microsoft Excel, na qual foram implementadas as equações de Hazel-Willians para o cálculo da perda de carga na tubulação e para a equação de cálculo de potência da bomba. A aba “Tubulação” (Tabela 2) contém os comprimentos totais, pressão de operação e fluxo das tubulações de alta e baixa pressão. A aba “Dados” (Apêndice B) contém os parâmetros utilizados nos cálculos de perda de carga e potência da bomba, constantes de Hazel-Willians para as tubulações, diâmetros das tubulações de alta e baixa pressão, rendimento da bomba, entre outros.

Dentro da aba “Dados” foram calculadas as potências necessárias para a irrigação da propriedade como um todo e as potências para a irrigação de cada sub-região a fim de encontrar a região crítica para a qual foi dimensionada a bomba. Segundo Bernardo (1995), para bombas de até 2 cv deve ser feito um superdimensionamento de 30% da potência necessária no sistema.

Baixa Pressão				
Manifold	Saída	Comprimento (metros)	Pressão na linha (bar)	Fluxo (L/min)
1	1	13.6	1.72	11.36
1	2	21.4	1.72	11.36
1	3	17.8	1.72	11.36
1	4	10.6	2.07	10.58
2	1	18.5	2.07	13.98
2	2	13.7	2.07	13.98
2	3	14.8	2.07	15.08
2	4	22.1	1.72	11.36
Alta Pressão				
1		1		44.66
2		19.2		54.4
Saída da bomba				
Total		1.5		99.06

Tabela 2: Aba Tubulação

5. RESULTADOS

5.1 Modelo do banco de dados

A fim de avaliar a fidelidade do modelo matemático e conseqüentemente a sua viabilidade como modelo para testar o sistema de controle foram analisadas as seguintes áreas em relação ao banco de dados gerado para um ano.

5.1.1 Distribuição de chuvas ao longo do ano

Para se verificar a distribuição das chuvas foram gerados 12 gráficos com o *flags* de chuva simulados, onde o sinal em alta representa a detecção de chuva e o sinal em baixo o tempo seco. Como verificados no apêndice C, o qual apresenta os gráficos com os *flags* de chuva simulados, a distribuição das chuvas segue o modelo probabilístico com meses mais chuvosos no começo e final do ano e meses de seca no meio do ano.

5.1.2 Precisão das previsões

Para analisar a precisão das previsões do tempo foram tomados os índices de confiabilidade de cada uma das fontes e foram gerados gráficos para cada um dos meses com a soma dos *flags* de chuva vindos dos sensores simulados e dos *flags* de chuva vindos do sistema de controle (baseados na média entre as 3 previsões do tempo). O sinal com valor dois ou zero representa coesão entre ambos os *flags*, casos onde a previsão foi correta, o sinal com valor um representa discrepância entre os *flags* indicando um erro na previsão. Os respectivos gráficos gerados para cada mês estão no apêndice D, “Comparação de *Flags*”.

As previsões meteorológicas simuladas para as fontes 1, 2 e 3 apresentaram fatores de confiança de 95%, 95%, 96% respectivamente. O que é refletido nos gráficos do apêndice D onde os meses mais chuvosos apresentam maior imprecisão nas previsões e os meses de seca são mais previsíveis.

5.2 Sistema de controle

O funcionamento do sistema de controle pode ser avaliado com a análise da variação da umidade do solo, simulada, e dos *flags* de irrigação, que representam os sinais que o controlador envia ao sistema de irrigação quanto a necessidade ou não de se irrigar o terreno, onde o sinal em alta (um) ativa o sistema de irrigação e um sinal em baixo (zero) mantém o sistema inativo.

5.2.1 Flags de irrigação

O sistema de controle envia sinais ao sistema de irrigação para iniciar e interromper a rotina de irrigação. O sistema de controle ativa o sistema de irrigação quando o valor da umidade do solo cai a baixo de um valor mínimo definido, para a simulação em questão 50%, e não há previsão de chuva para o dia em questão. Para a simulação o sistema de controle após acusar a baixa umidade verifica as previsões meteorológicas e calcula a média ponderada das três previsões, usando os fatores de confiabilidade como pesos, e caso a média esteja abaixo de uma porcentagem pré-definida (60% foi o valor que apresentou melhores resultados nas simulações) ele envia o *flag* de irrigação com valor alto ativando o sistema de irrigação.

Os gráficos com os flags de irrigação detalhados para cada mês são apresentados no apêndice E. Como esperado o sistema de irrigação é ativado com maior frequência nos meses de seca e mais esparsamente nos meses chuvosos.

5.2.3 Controle da Umidade

O funcionamento do sistema de controle pode ser mais diretamente avaliado tomando como base a variação da umidade do solo simulada pelo modelo matemático. As variações na umidade do solo foram modeladas seguindo as seguintes regras:

- Levando em conta a variação nas condições climáticas entre meses mais úmidos e mais secos foi utilizada a distribuição probabilística gerada no modelo matemático como parte do algoritmo para simular a variação da umidade do solo. O valor da distribuição para o mês em questão será referido como Distribuição Probabilística de Chuva (DPC).
- Caso a previsão erre e o sistema irrigue em um dia de chuva a umidade do solo sobe para $80\% + 10\% \cdot \text{DPC}$. Levando em conta que nos meses mais chuvosos o erro acarreta em um aumento maior da umidade.
- Caso o sistema preveja chuva e erre o sistema é ativado no modo de irrigação noturna e a umidade é estabilizada em 70%. Simulando a irrigação reduzida do sistema.
- Caso o sistema irrigue e acerte na previsão (não chova) a umidade é elevada para 80%. O qual representa o valor ideal de umidade programado no sistema.
- Nos dias chuvosos a umidade aumenta de $40\% + 10\% \cdot \text{DPC}$. Considerando uma variação no volume de chuva com base no mês em questão.

- Diariamente a umidade do solo cai de $20\% + 10\% \cdot \text{DPC}$. Representando as perdas naturais de umidade pelo solo, levando em consideração que tais perdas variam de acordo com as condições climáticas do mês em questão.

O gráfico representando a variação na umidade do solo está representado na figura 10.

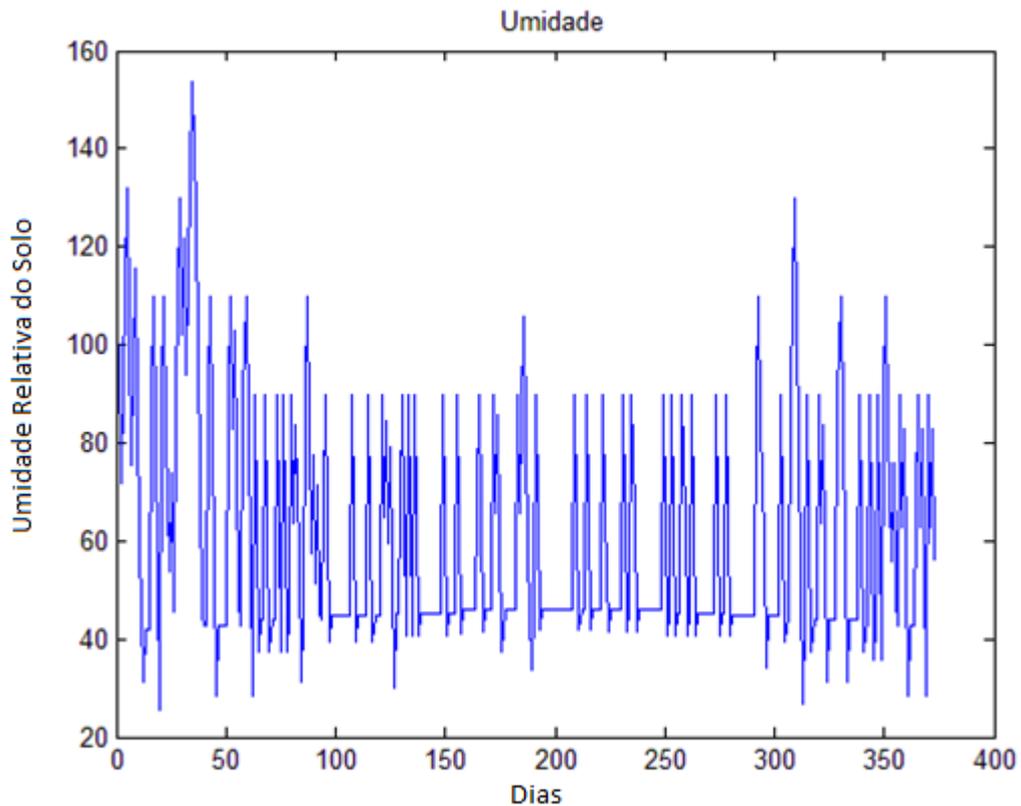


Figura 10: Umidade do solo

No gráfico da umidade pode ser verificada a atuação do sistema no controle da mesma. Os meses de maior seca, onde a irrigação se faz mais necessária, a umidade apresenta valores mais constantes dado que a umidade é quase exclusivamente regulada pelo sistema de irrigação, já os meses chuvosos apresentam picos que podem ser causados por erro na previsão de chuva por parte do sistema ou sequências de dias chuvosos.

6. APRIMORAMENTOS FUTUROS

O trabalho apresenta gira em torno de um modelo de irrigação pré-definido (irrigação por aspersão), dado a disponibilidade dos componentes, e é um trabalho bibliográfico que propõe um sistema de irrigação visando a otimização em todas as suas frentes. Dessa forma o trabalho abre a possibilidade para estudos mais aprofundados e abordagem de novos conceitos a fim de criar um sistema ótimo.

6.1 Modelo matemático

Embora o modelo adotado contemple o comportamento das chuvas de maneira objetiva e simplificada, ele se abre para um estudo mais detalhado quanto ao modelo meteorológico. A distribuição das chuvas ao longo do ano sofrem diversas influências que podem ser mais precisamente estudadas e detalhadas, alguns exemplos dessas influências são:

- Altitude, a qual influencia no ponto de orvalho, nas perdas por evaporação entre outros.
- Latitude e longitude, a cidade para a qual se cria o modelo pode influenciar fortemente o comportamento das estações de seca e chuva, dadas as diferentes topografias e condições climáticas para cada região.
- Tipo de solo, influencia diretamente na absorção e perda de umidade do solo.

6.2 Parâmetros do sistema

Os parâmetros utilizados pelo sistema de controle para a sua simulação tais como porcentagem mínima para prever chuva, valor de umidade ideal do solo, perdas de umidade, entre outros, apresentam possibilidade de refinamento dada peculiaridade de cada sistema para uma aplicação real onde a umidade ideal depende da cultura a ser irrigada. Os parâmetros podem ser otimizados com base em modelos experimentais para comprovar ou corrigir o modelo teórico atual.

6.3 Sistema de tratamento da água

O sistema de tratamento atual tem por objetivo reduzir a presença de particulados no sistema que possam causar bloqueios, porém de acordo com Pinto (2010) o pH da água pode apresentar grande influência no comportamento do sistema em certas condições, um pH desregulado pode causar oxidação ou calcificação de componentes do sistema e para isso pode ser elaborado um sistema de controle para a qualidade da água, uma vez que as águas pluviais estão fortemente sujeitas a influências atmosféricas, como verificado por Silva Filho (2011).

6.4 Sistema de irrigação

O sistema de irrigação por aspersão, segundo Marouelli (1998), apresenta alta eficiência, 60% a 85%, porém o modelo de irrigação localizada apresenta uma faixa de

eficiência de 80% a 95% e redução de até 50% no consumo de energia. O sistema de irrigação abre espaço para novas abordagens quando ao modelo de irrigação utilizado e sua implementação em escala residencial.

7. Conclusão

Ao final do trabalho o objetivo de se criar um modelo base para o projeto e implementação de um sistema automatizado de irrigação foi atingido, porém o modelo não foi implementado durante o desenvolvimento desse projeto.

A lógica de controle foi implementada e simulada com sucesso no MATLAB, o controle da umidade apresentou resultados satisfatórios com alguns picos esperados nos meses mais chuvosos onde a incerteza nas previsões é maior e o volume de chuva aumenta.

O projeto hidráulico foi automatizado com sucesso utilizando o Microsoft Excel, tornando o cálculo da potência simples e rápido.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

DAKER, A. *Hidráulica aplicada à agricultura: Água na agricultura*. 6 ed. Rio de Janeiro: Freitas Bastos, 1983.

Ministério do Meio Ambiente. Água, um recurso cada vez mais ameaçado. Disponível em http://www.mma.gov.br/estruturas/sedr_proecotur/_publicacao/140_publicacao09062009025910.pdf. Acesso em Julho, 2016.

BERNARDO, S. *Manual de Irrigação*, 6 ed. Viçosa: Imprensa Universitária, 1995

BISCARO, Guilherme Augusto. *Sistemas de irrigação por aspersão*. Dourados: UFGD, 2009.

CARVALHO, Guilherme Busi. *Dimensionamento e simulação hidráulica da irrigação localizado sob condição variável de setores de operação*. Tese (Mestrado em Agronomia) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2004.

CHRISTOFIDIS, D. *Situação das áreas irrigadas: métodos e equipamentos de irrigação*. Brasil. Disponível em <<http://www.mma.gov.br/port/srh/acervo/publico/doc/srhde>>. Acesso em Julho, 2016.

KAMAND, F. Z. Hydraulic Friction Factor for Pipe Flow. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. New York, v. 114, n. 2, p. 311-323, 1988.

MARQUELLI, W.A.; SILVA, W.L.C. Seleção de sistema de irrigação para hortaliças. Brasília, *Circular técnica da Embrapa Hortaliças*, nº 11, junho, p. 1-15, 1998. Disponível em <<http://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/107339/1/CNPH-DOCUMENTOS-11-SELECAO-DE-SISTEMAS-DE-IRRIGACAO-PARA-HORTALICAS-FL-07821.pdf>>. Acesso em julho de 2016.

OGATA, K. Introdução aos Sistemas de Controle. In: *Engenharia de Controle Moderno*. 3ª. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2000.

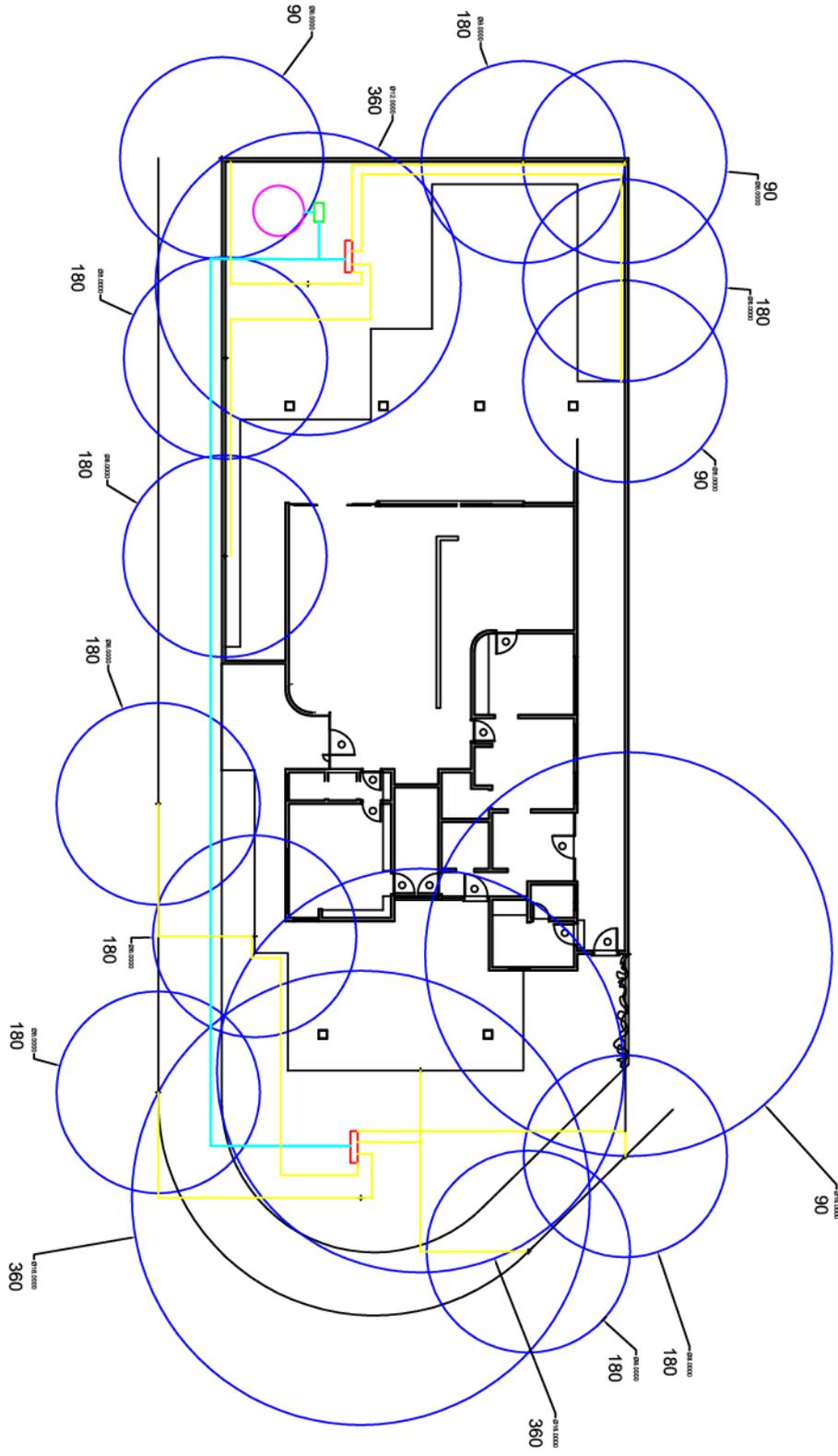
OLIVEIRA FILHO, Dely et al . Dimensionamento de motores para o bombeamento de água. *Engenharia Agrícola*, Jaboticabal, v. 30, n. 6, p. 1012-1022, Dec. 2010.

ORBIT. In: Orbit Online. Disponível em <<https://www.orbitonline.com/>>. Acesso em 2016.

- PINTO, Marinaldo Ferreira. *Desenvolvimento de um sistema para o controle do pH da água para irrigação localizada*. Dissertação (Mestrado em Irrigação e drenagem) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2010.
- PORTO, R. M. *Hidráulica básica*. São Carlos: USP, EESC, 1998.
- RETTORE NETO, Osvaldo. *Modelo para determinação da perda de carga contínua em tubos elásticos*. Tese (Doutorado em Irrigação e Drenagem) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2011.
- SILVA FILHO, M. V. *Avaliação dos efeitos locais na composição química de águas de chuva nas cidades de São Paulo e Cubatão*. Dissertação (Mestrado), USP. 2011.
- TESTEZLAF, R. Filtros de areia aplicados à irrigação localizada: teoria e prática. *Engenharia Agrícola*, Jaboticabal, v.28, n.3, p.604 – 613, 2008.
- ZAMBROZI JUNIOR, P. *Sensor de umidade microeletrônico baseado em capacitor com dielétrico higroscópico*. Dissertação (Mestrado), UNICAMP. 2005.
- CATS, H. *Control Systems – Their Measure and Abuse*. Disponível em: <http://herdingcats.typepad.com/my_weblog/2014/07/control-systems-their-misuse-and-abuse.html>. Acesso em: 2 nov. 2014.
- DECAGON. Disponível em: <<http://www.decagon.com.br/>>
- FILIFELOP. Disponível em: <http://www.filipeflop.com/pd-ab147-sensor-de-chuva.html>
- FBSELETRONICA. Disponível em: <https://fbseletronica.wordpress.com/2013/11/02/controle-de-nivel-de-agua/>
- VERMEIREN, L. *Irrigação localizada*. Trad. de H.R Gheyi, F.A.V Damasceno, L.G.A Silva Jr. E J.F. de Medeiros. Campina Grande: UFPB, 1997.
- MICROSOFT Exel. In: *Wikipedia*. Disponível em <https://en.wikipedia.org/wiki/Microsoft_Excel>. Acesso em 2016.
- AUTOCAD. In: *Wikipedia*. Disponível em <<https://pt.wikipedia.org/wiki/AutoCAD>>. Acesso em 2016.

8. APÊNDICES

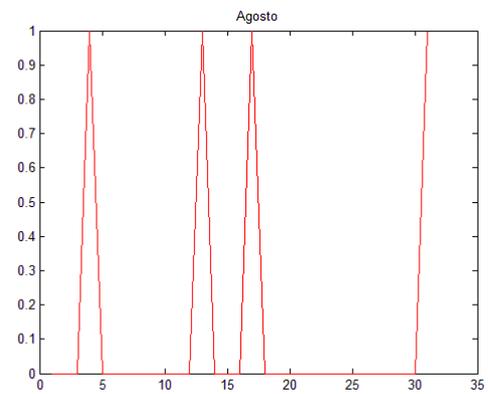
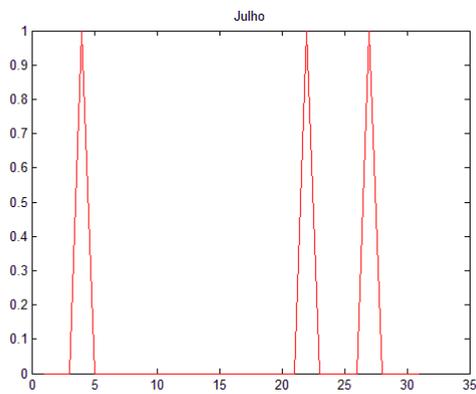
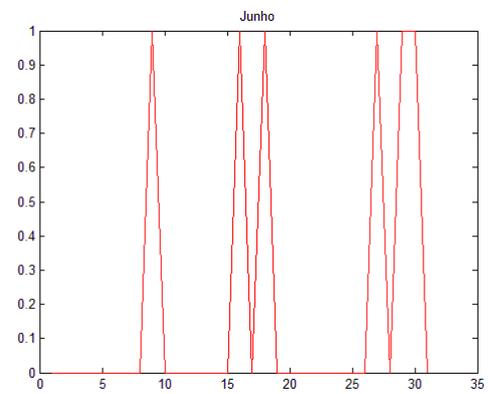
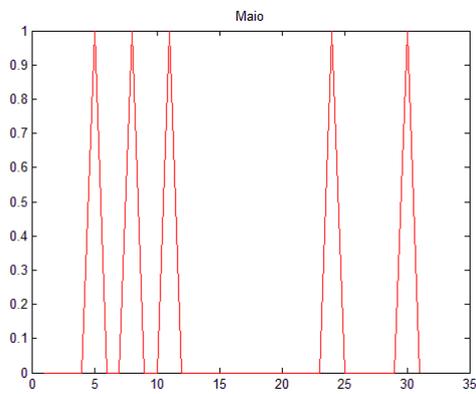
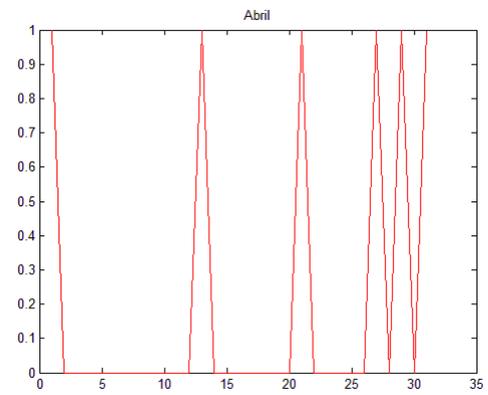
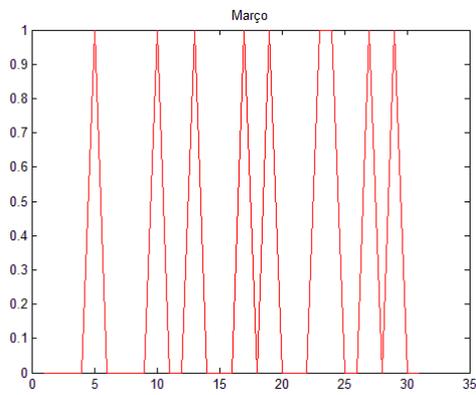
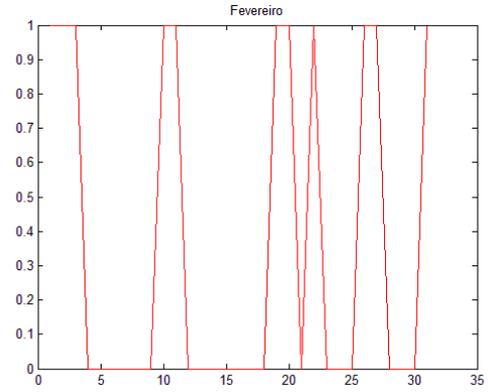
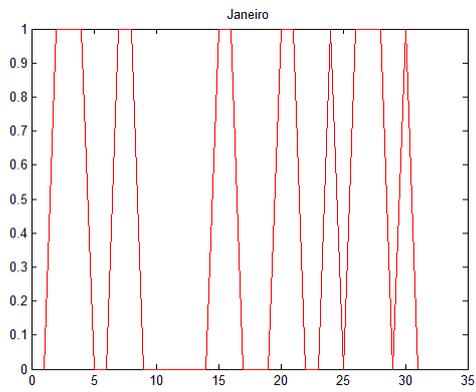
8.1 APÊNDICE A - Planta irrigada.

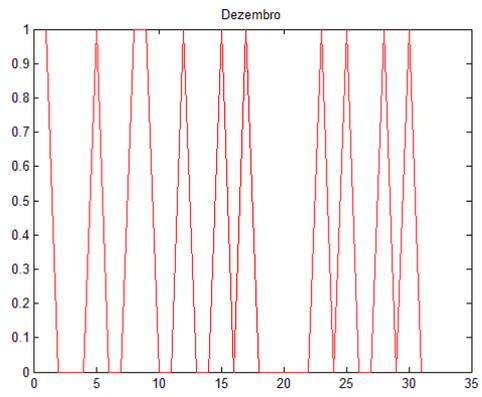
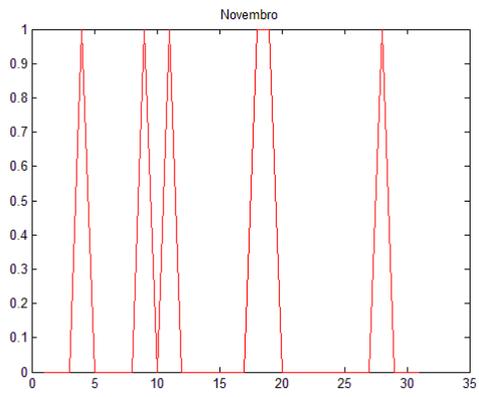
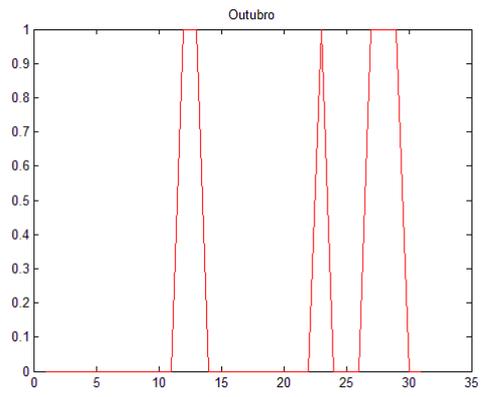
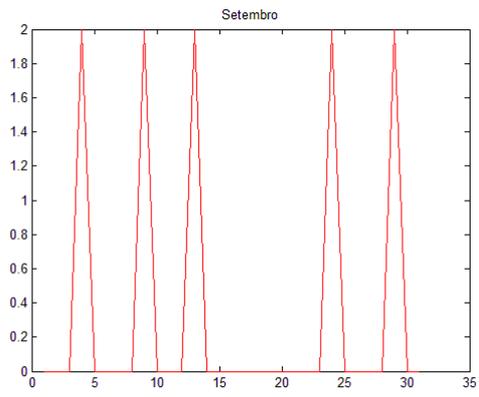


8.2 APÊNDICE B – Aba “Dados”

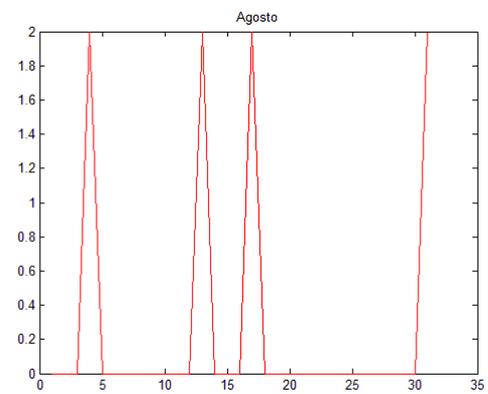
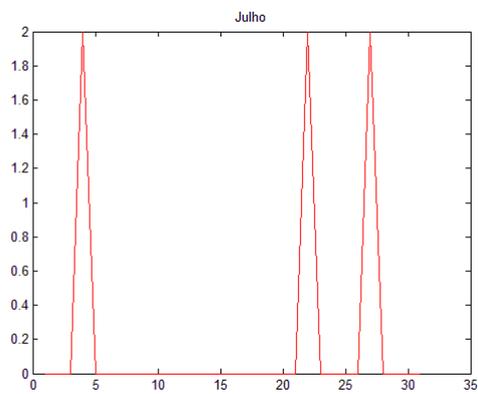
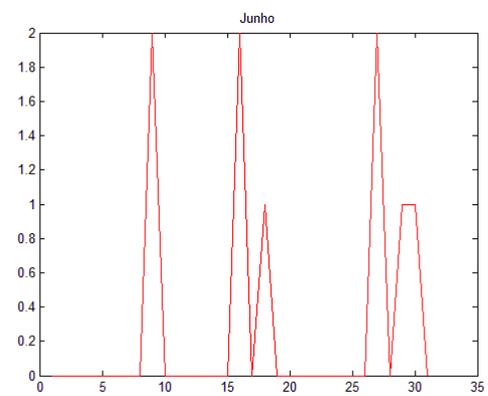
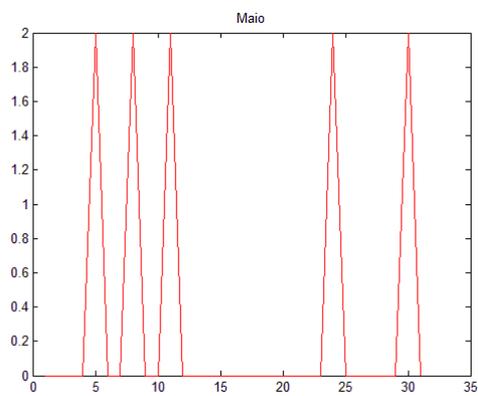
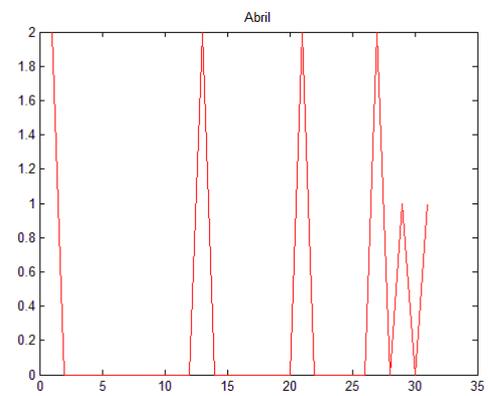
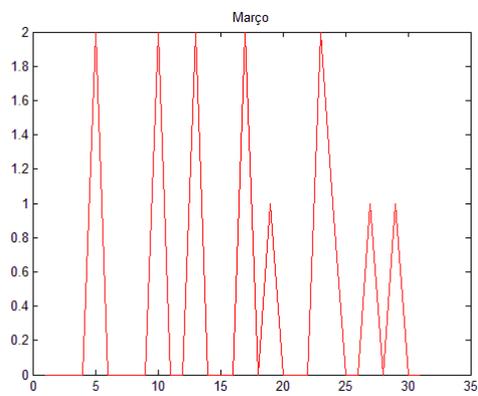
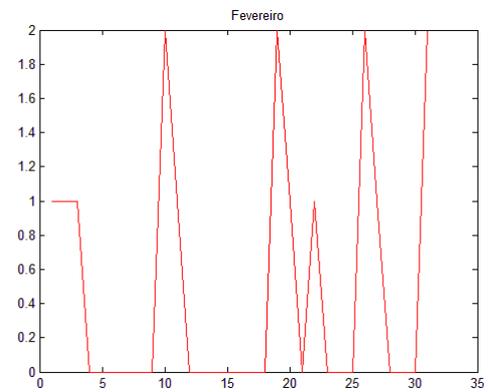
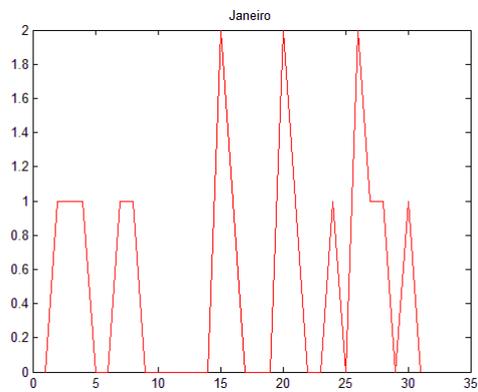
Dados		Resultados	
Comprimento do encanamento de baixa pressão	132.5	Perda de carga na alta pressão	0.90709389
Diâmetro do encanamento de baixa pressão (m)	0.025	Perda de carga na baixa pressão	58.69229149
Comprimento do encanamento de alta pressão	20.2	Perda de carga nas curvas de alta pressão	3.27096E-06
Diâmetro do encanamento de alta pressão (m)	0.04	Perda de carga nas curvas de baixa pressão	2.7258E-06
Vazão Máxima (m ³ /s)	0.001651	Altura Manométrica	60.59939138
Coefficiente de Hazen-Williams para o material dos tubos (PVC)	150	Potência da Bomba (CV)	4.446648674
Fator de correção de potência	30%	Potência da Bomba Corrigida (CV)	5.780643276
Altura do reservatório para bomba (m)	1		
Rendimento do conjunto Motobomba (%)	0.3		
Número de curvas na tubulação de alta	3		
Número de curvas na tubulação de baixa	26		
Coefficiente de perda de carga na curva de alta	2.4		
Coefficiente de perda de carga na curva de baixa	2		
Vazão Máxima (m ³ /h)	5.9436	Potência da Bomba A1 (CV)	1.019865313
Vazão Área 1 (m ³ /s)	0.000379	Potência da Bomba A2 (CV)	0.984852331
Vazão Área 2 (m ³ /s)	0.000366	Potência da Bomba A3 (CV)	1.255080728
Vazão Área 3 (m ³ /s)	0.000466	Potência da Bomba A4 (CV)	1.186850302
Vazão Área 4 (m ³ /s)	0.000441		

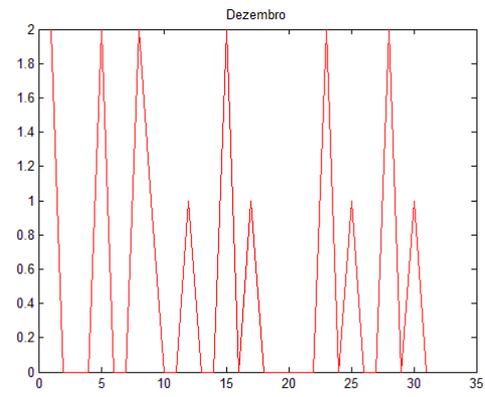
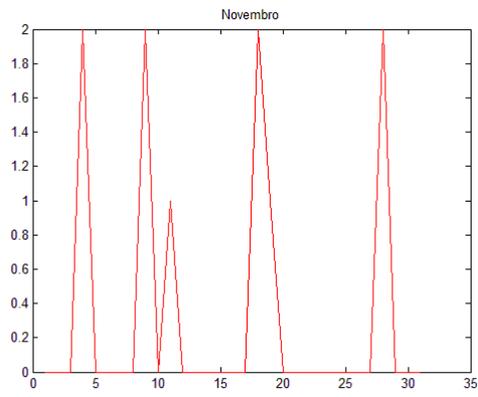
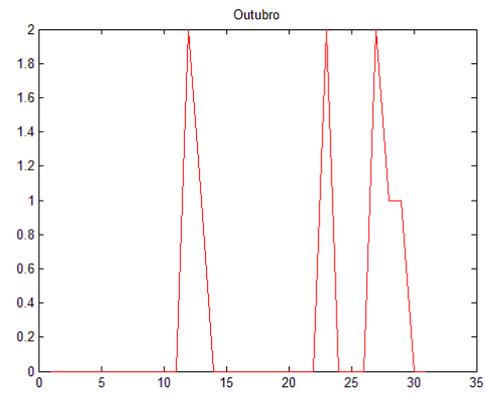
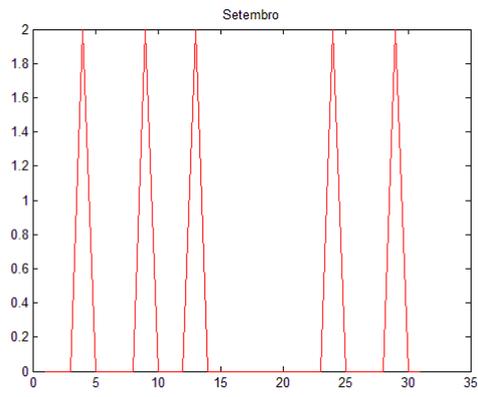
8.3 APÊNDICE C – Gráficos “Flag de Chuva”





8.4 APÊNDICE D – Gráficos “Comparação de *Flags*”





8.5 APÊNDICE E – “Flags de irrigação”

