

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO ABC**  
**CMCC - Centro de Matemática, Computação e Cognição**

Thiago Issamu Okazaki

RA: 11122608



Universidade Federal do ABC

---

**Sistema Robótico Inteligente de Combate a Incêndio**

Prof. Dr. Rogério Perino de Oliveira Neves  
**Orientador**

Santo André, SP  
Setembro de 2011

Thiago Issamu Okazaki

# **Sistema Robótico Inteligente de Combate a Incêndio.**

Trabalho submetido à Universidade Federal do ABC como parte dos requisitos do projeto de pesquisa de Iniciação Científica.

Orientador: Professor Dr. Rogério Perino de Oliveira Neves

Santo André, SP  
Setembro de 2011

## RESUMO

Os sistemas contra incêndio largamente empregados são os denominados sob comando no qual necessitam de suporte humano para seu funcionamento, tais sistemas auxiliam a brigada contra incêndio no combate direto, porém sistemas de chuveiro automático são mais eficazes, visto que atuam independentemente da intervenção humana e antes mesmo da chegada do corpo de bombeiros, representando um nível maior de segurança para o ambiente. A implantação de sistemas modernos, como o sistema de chuveiro automático ou sistemas de supressão de fogo à gás exigem prévia análise de viabilidade devido aos altos custos de implantação e adaptação do local. Uma grande desvantagem dos sistemas automáticos atuais é o disparo não localizado do agente de combate o que, eventualmente, pode ocasionar transtorno com prejuízos materiais, caso o foco de incêndio seja pequeno e facilmente controlável. Nesse contexto, o projeto do sistema inteligente contra incêndio visa auxiliar o combate a chamas de forma tão eficaz quanto um sistema automático padrão, visando suprimir as principais desvantagens desse sistema. Um protótipo funcional foi construído através da utilização de uma plataforma de prototipagem simples como o Lego Mindstorm NXT. O protótipo consiste num braço robótico equipado com motores que permitem dois graus de mobilidade, na extremidade do braço há uma câmera CCD/IR e uma mangueira extintora, um sistema controlador de posicionamento localiza o fogo e aciona o sistema extintor. Foram realizados testes para obtenção dos parâmetros da câmera CCD/IR, para medição de velocidade do sistema controlador e para medição da eficiência do sistema extintor. Uma breve análise comparou a eficiência e os custos do sistema inteligente proposto com o sistema de chuveiro pendente automático.

**Palavras-Chave:** sistemas inteligentes; robótica; supressão de fogo automático; extintor; combate a incêndio; lego Mindstorm NXT.

## SUMÁRIO

|  |           |
|--|-----------|
| <b>1. INTRODUÇÃO</b> .....   | <b>5</b>  |
| <b>2. OBJETIVOS</b> .....  | <b>7</b>  |
| <b>2.1. OBJETIVO GERAL</b> .....   | <b>7</b>  |
| <b>2.2. OBJETIVO ESPECÍFICO</b> .....  | <b>7</b>  |
| <b>3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....  | <b>8</b>  |
| <b>3.1. CONTROLE REMOTO DO VÍDEO-GAME NINTENDO WII</b> .....                               | <b>8</b>  |
| <b>3.2. TEORIA RELACIONADA A INCÊNDIOS</b> .....   | <b>9</b>  |
| <b>3.3. SISTEMAS DE COMBATE A INCÊNDIO</b> .....   | <b>12</b> |
| <b>3.4. COMUNICAÇÃO TCP/IP E BLUETOOTH</b> .....   | <b>15</b> |
| <b>3.5. NXT LEGO E LINGUAGEM LEJOS</b> .....   | <b>16</b> |
| <b>3.6. CONTROLE DE SISTEMAS DINÂMICOS</b> .....   | <b>17</b> |
| <b>3.7. LÓGICA NEBULOSA</b> .....  | <b>19</b> |
| <b>4. METODOLOGIA</b> .....  | <b>20</b> |
| <b>4.1. MÓDULOS DE PROGRAMAÇÃO</b> .....   | <b>21</b> |
| <b>4.2. ESTRUTURA DO PROTÓTIPO</b> .....   | <b>22</b> |
| <b>4.3. SISTEMA EXTINTOR</b> .....   | <b>23</b> |
| <b>4.4. CONTROLE DINÂMICO E SISTEMAS DE COMUNICAÇÃO</b> .....                              | <b>24</b> |
| <b>4.5. TESTES E PARÂMETROS DO SISTEMA</b> .....   | <b>25</b> |
| 4.5.1. <i>Teste de alcance de detecção</i> .....   | <b>25</b> |
| 4.5.2. <i>Teste de velocidade de controle</i> .....  | <b>27</b> |
| 4.5.3. <i>Testes com o sistema extintor</i> .....  | <b>27</b> |
| <b>5. RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....  | <b>28</b> |
| <b>5.1. SISTEMAS DE CONTROLE E COMUNICAÇÃO</b> .....                                       | <b>28</b> |
| 5.1.1. <i>Programa de aquisição (Wiimote)</i> .....  | <b>28</b> |
| 5.1.2. <i>Programa Controlador</i> .....   | <b>29</b> |
| 5.1.3. <i>Programa NXTControl</i> .....  | <b>31</b> |
| 5.1.4. <i>Controladores Dinâmicos</i> .....  | <b>33</b> |
| <b>5.2. PROTÓTIPO ROBÓTICO</b> .....   | <b>39</b> |
| 5.2.1. <i>Estrutura do Protótipo</i> .....   | <b>39</b> |
| 5.2.2. <i>Sistema Extintor</i> .....   | <b>42</b> |
| <b>5.3. TESTES E PARÂMETROS DO SISTEMA</b> .....   | <b>45</b> |
| 5.3.1. <i>Resultados do teste de alcance de detecção</i> .....                             | <b>45</b> |
| 5.3.2. <i>Resultados do teste de velocidade de controle</i> .....                          | <b>48</b> |
| 5.3.3. <i>Resultados dos testes com o sistema extintor</i> .....                           | <b>49</b> |
| <b>5.4. ANÁLISE DE VIABILIDADE E COMPARAÇÃO COM O SISTEMA DE CHUVEIRO AUTOMÁTICO</b> ..... | <b>52</b> |
| <b>6. CONCLUSÃO</b> .....  | <b>54</b> |
| <b>7. REFERÊNCIAS</b> .....  | <b>56</b> |

## 1. INTRODUÇÃO

Quando se analisa um sistema de proteção contra fogo, vários fatores devem ser levados em consideração: perdas econômicas, redução ou paralisação total das atividades comerciais ou industriais e, principalmente, as perdas de vidas humanas. Um incêndio deve ser quantificado e qualificado sob a perspectiva de perdas de vidas e da destruição de bens e seus efeitos adversos.

Na década de 70 e 80, segundo BRETANO (2007), ocorreram grandes incêndios em edificações altas e lojas de departamento, tais como em São Paulo (SP): Edifício Andraus (1972), Ed. Joelma (1974), Conjunto nacional (1978), entre outros. Esses eventos marcaram um novo período de preocupação com a segurança contra incêndios nas edificações. Incêndios onde vidas foram perdidas, danos materiais incalculáveis, perdas de documentos importantes, além de gerar uma fobia coletiva do fogo nas grandes edificações, aumentando a preocupação na criação de dispositivos de combate e prevenção a incêndio.

Visando cumprir as normas nacionais de segurança e prevenção contra incêndio, cada vez mais empresas buscam soluções eficazes para combate a chamas. Existem dois principais sistemas de combate a incêndio, denominados: sob comando e automático. O tipo de sistema largamente empregado nas edificações é o sistema sob comando que necessita de intervenção humana. São constituídos pelo fornecimento de pontos de água estratégicos aliado à pontos de extintores. O sistema mais moderno é o sistema automático que, conforme BRETANO (2007) é o mais indicado em edificações em geral. O sistema automático é constituído por sensores de calor e fumaça, um sistema de controle e atuadores na forma de esguicho de água ou gás denominado *sprinkler*.

De acordo com BRETANO (2007), porém, em edificações de alto risco quando o fogo pode atingir rapidamente proporções maiores, a demora no início do combate ao incêndio, o jato de água que não é tão efetivo como a aspersão da água na absorção do calor, a baixa visibilidade devido à fumaça e a grande quantidade de calor impedem o acesso rápido ao local do incêndio inviabilizando, para este caso, um sistema unicamente sob comando.

O sistema automático contra incêndio é bastante eficaz, principalmente aliado ao sistema sob comando, desde que o mesmo seja manipulado por pessoas treinadas adequadamente. Entretanto, o projeto de um sistema automático contra incêndio é bastante custoso, pois exige instalações adequadas de redes hidráulicas de distribuição, bombas de

água (caso não atenda a demanda de pressão) e um reservatório dedicado. Ainda, caso o foco de incêndio seja pequeno e possível de se controlar rapidamente com extintores sob comando ou exista equipamentos eletro-eletrônicos no ambiente, o emprego do sistema de chuveiro automático à água pode agravar o incêndio, além de ocasionar um grande prejuízo material. Vale ressaltar também que o *sprinkler* é acionado somente quando o calor das labaredas atinge a altura do teto e dependendo do pé-direito do ambiente (altura até o teto) o fogo já pode se encontrar em proporções descontroláveis.

A possibilidade do emprego de robôs em ambientes hostis, tais como um incêndio, têm despertado o interesse da comunidade acadêmica, como exemplo citado por FERREIRA et al. (2007) o robô SACI (Sistema de Apoio ao Combate de Incidentes) da Armtec – empresa hospedada na universidade de Fortaleza (UNIFOR), trata-se de um agente motorizado controlado à distância que transporta um canhão de combate a incêndio. Um veículo controlado remotamente capaz de manipular um agente extintor perto do foco da chama evitando exposição de vida humana.

Dentro da problemática de incêndio e controle de chamas foi concebido o projeto de um protótipo de baixo custo para um sistema fixo de combate a incêndio baseado num controlador robótico. Consiste num braço mecânico equipado com uma câmera infravermelho (Sensor CCD/IR), que, através de um sistema robótico inteligente, procura e detecta o foco de incêndio apagando o mesmo com um jato de água localizado, o que significa menores prejuízos materiais devido à exposição do ambiente ao agente extintor.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1. Objetivo Geral**

O principal objetivo deste projeto é a construção de um protótipo robótico fixo do sistema inteligente de combate a incêndio, através do emprego de sensores de baixo custo e ferramentas de prototipagem como o kit lego Mindstorm NXT. Analisar comparativamente as vantagens e eficiência desse novo sistema, com sistemas automáticos já existentes. Viabilizar a construção de protótipos de baixo custo para soluções de problemas robóticos.

### **2.2. Objetivo específico**

O projeto visa atingir os seguintes objetivos específicos:

- Estudo dos métodos e princípios de combate à incêndio
- Estudo do código-fonte em C# disponibilizado por LEE (2008) para comunicação da câmera CCD IR com o Desktop
- Desenvolvimento de um método de transmissão de dados do programa de aquisição da câmera (desenvolvido por LEE (2008)) para o programa controlador que será desenvolvido
- Integração entre sensor e atuador (NXT) através de um programa controlador central (desenvolvido em JAVA).
- Construção do protótipo mecânico funcional.
- Programação e implementação do sistema de controle dinâmico.
- Determinar parâmetros de eficiência do protótipo e da câmera IR.
- Construção de um sistema extintor acionado eletricamente que emprega água como agente de combate.
- Determinação dos parâmetros e análise da eficiência do sistema extintor empregado.

### 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1. Controle Remoto do Vídeo-Game Nintendo Wii

Segundo LEE (2008), um ano após o lançamento no mercado do console de vídeo-game Nintendo Wii, mais de 20 milhões de unidades tinham sido vendidas no mundo inteiro. O sucesso de vendas é atribuído a inovadora tecnologia de interatividade permitida pelo controle do vídeo game denominado Wiimote ou Wii Remote.

O controle remoto Wii é um dispositivo portátil sem fio e de baixo custo (inferior a US\$ 30 nos EUA), semelhante a um controle remoto de televisão, porém, segundo LEE (2008) contém um acelerômetro de 3 eixos uma câmera infra-vermelha de alta resolução e alta velocidade, um microfone, motor de vibração e conexão Bluetooth, o que o torna um dos mais sofisticados dispositivos de entrada compatíveis com computadores PC.

As informações técnicas do Wiimote não estão disponíveis ao público, porém a comunidade científica e *hackers* têm feito importantes pesquisas e engenharia-reversa no dispositivo, coletando informações do seu funcionamento interno. Algumas informações foram disponibilizadas conforme cita LEE (2008).

##### *Câmera IR*

Na extremidade superior de todo controle Wii existe uma câmera sensor de Infra-vermelho (CCD IR) que permite até 4 pontos simultâneos de fonte luminosa. Segundo LEE (2008) os dados exatos não estão disponíveis, porém a câmera apresenta uma resolução aproximada de 1024 x 768 pixels, mais de 4 bits de capacidade para intensidade luminosa, taxa de atualização de 100 Hz e um campo de visão de 45°. Conforme LEE (2008) a resolução e a taxa de atualização mostram-se mais eficientes que webcams padrões, além disso, apresenta um custo relativamente mais baixo, comparado a câmeras especializadas em infra-vermelho.

##### *Bluetooth*

Toda comunicação ocorre através de uma comunicação sem fio Bluetooth. O dispositivo apresenta um chip da Broadcom 2042 que foi desenvolvido seguindo os padrões do Bluetooth HID (Human Interface Device), tais como mouse e teclados.

Ainda é possível citar outros dispositivos integrados como:

- Botões
- LED para Feedback
- Bateria
- Porta de expansão
- Falantes de Som
- Acelerômetro Linear de 3 eixos
- Memória Interna (Aproximadamente 5 Kbyte)

### 3.2. Teoria Relacionada a Incêndios

O fogo pode se definido como:

“Uma reação química, denominada combustão, que é uma oxidação rápida entre o material combustível, sólido, líquido ou gasoso, e o oxigênio do ar, provocada por uma fonte de calor.” (BRETANO, 2007, p39).

Para que haja fogo deve ocorrer simultaneamente 3 elementos essenciais conforme exibido na figura 1



Figura 1 – Triângulo do Fogo [PME PR]

Logo, para existência do fogo devem coexistir combustível, material comburente e calor. Combustível é toda matéria suscetível a queimar, podendo ser sólido, líquido ou gasoso. Como exemplo: madeira, carvão, papel, gasolina, álcool, metano, etc. O comburente, geralmente o oxigênio do ar, que é o agente químico que ativa e conserva a combustão combinando-se com os gases ou vapores do combustível. O calor é o elemento que inicia a reação química, ou seja, é o provocador da reação. Podendo ser uma faísca, um superaquecimento, atrito, explosão, etc.

### Classes de Incêndio

Segundo BRETANO (2007) os incêndios podem ser classificados em cinco classes, sendo elas:

Classe A – São os fogos em materiais combustíveis comuns, ordinários, como madeira, papel, tecido, etc. Pode ser extinto por resfriamento utilizando como agente a água.

Classe B – São os fogos formados nas superfícies de líquidos inflamáveis como gasolina, álcool, óleos, etc; e nos gases inflamáveis como metano, GLP, entre outros. Os agentes extintores podem ser pós químicos, CO<sub>2</sub>, água nebulizada e espuma mecânica.

Classe C – São os incêndios em equipamentos elétricos energizados, são utilizados agentes extintores não-condutores, tais como o pó químico e o CO<sub>2</sub>.

Classe D – São os fogos em metais combustíveis, chamados metais pirofóricos são os metais da família dos Alcalinos e Alcalinos-terrosos altamente reativos com oxigênio. O combate exige técnicas e agentes específicos.

Classe K – São incêndios em óleos e gorduras em cozinhas.

### Métodos de extinção de incêndio

A partir do conhecimento dos elementos necessários para ocorrer um incêndio, é possível deduzir que para extinguí-lo basta eliminar pelo menos um dos 3 elementos ou interromper a reação química em cadeia.

Conforme BRETANO (2007) os métodos de extinção são classificados conforme o elemento componente do fogo que se deseja neutralizar

Extinção por isolamento (retirada do material): Em algumas situações de incêndio é possível retirar o material combustível. Por exemplo, no caso de tanques de combustível o fogo ocorre na superfície, sendo possível a retirada do fluido pelo fundo do reservatório.

Extinção por abafamento (retirada do comburente): Neste caso, procura-se evitar que o material em combustão seja alimentado por mais oxigênio do ar, reduzindo sua concentração na mistura inflamável. No caso de incêndios em edificações isto é possível utilizando-se espuma aquosa que é insolúvel em água formando uma barreira contra o oxigênio, ou através do isolamento do local. Outra forma é a redução da concentração de oxigênio com o ar através de gases inertes mais densos que o ar, tais como argônio, nitrogênio e gás carbônico (CO<sub>2</sub>).

Extinção por resfriamento (retirada de calor): Com a utilização adequada de um agente extintor ocorre a absorção do calor do fogo e do material em combustão, com o conseqüente resfriamento deste. Quando a perda de calor do material combustível pelo agente extintor é maior que a recebida pelo fogo, então o fogo começa a ser controlado até sua completa extinção. Em geral este método é o mais utilizado para apagar incêndios em edificações e o agente extintor mais utilizado é a água.

Extinção química (quebra da cadeia de reação química): Despejando-se determinados agentes extintores ao fogo, suas moléculas se dissociam pela ação do calor formando radicais livres que se combinam com a mistura inflamável resultando do vapor do material combustível com o comburente, formando uma mistura não-inflamável, interrompendo a reação química em cadeia. O agente extintor mais utilizado nesse método são os pós químicos secos que agregam à sua composição bicarbonato de sódio, bicarbonato de potássio e o monofosfato de amônia.

### 3.3. Sistemas de combate a incêndio

Os sistemas de combate a incêndio são classificados em dois tipos, sistema sob comando e sistema automático. Como dito anteriormente, os mais empregados são do tipo sob comando. São empregados 4 tipos de agentes extintores, segundo BRETANO (2007).

- Espuma Aquosa ou mecânica
- Gases inertes
- Pó químico seco
- Água

Basicamente um sistema sob comando consiste de pontos estratégicos de fornecimentos desses agentes extintores nas edificações. A água é o agente extintor mais utilizado, pois, segundo BRETANO (2007) é o mais difundido pela natureza, tem alto poder de absorção do calor (age sobre o fogo por resfriamento e abafamento) e é um agente extintor seguro (atóxico).

Os pontos de água são divididos em hidrantes e mangotinho. Segundo BRETANO (2007) mangotinho é um ponto de tomada de água onde há uma simples saída contendo válvula de abertura rápida, adaptador, mangueira semi-rígida (diretamente acoplada), esguicho regulável e demais acessórios. O sistema hidrante constitui de tomadas de incêndio onde pode haver duas ou uma saída de água, essas tomadas são formadas por válvulas angulares, adaptadores e tampão. O sistema pode estar abrigado em uma caixa de incêndio contendo mangueiras de hidrantes e esguichos que, diferentemente do mangotinho, são acoplados somente por ocasião do incêndio.

O sistema automático é o tipo de sistema de combate a incêndio mais moderno, são compostos por um sistema de chuveiro automático denominado *Sprinkler*, os principais tipos são:

- Pendente;
- De pé (upright)
- Lateral;
- Especiais.



**Figura 2 – Tipos de chuveiro automático – Sprinklers (GONÇALVES; OLIVEIRA, 2007)**

A figura 2 ilustra os principais tipos de sprinklers. Os sprinklers são posicionados estrategicamente para emissão de fluido extintor à base de água ou gases inertes, sua ação independe de intervenção manual e podem ser de dois tipos: aberto ou automático.

O sistema aberto dispara os chuveiros simultaneamente e apresentam sensores de fumaça e calor para detecção de focos de incêndio. O sistema automático compõe um sensor em cada chuveiro, tal sensor, segundo (GONÇALVES; OLIVEIRA, 2007), é um bulbo sensível a determinadas temperaturas, o bulbo pode ser de dois tipos: ampola e solda eutética, as temperaturas de sensibilidades são dimensionadas conforme o risco e tipo de incêndio, a tabela 1 ilustra, como exemplo, as temperaturas de operação e o tipo de incêndio adequado para cada tipo de solda eutética.

**Tabela 1 – classificação e temperatura de operação para o bulbo de solda eutética.**

| Temperatura máxima no telhado °C | Temperatura recomendada do chuveiro °C | Classificação da temperatura de funcion. do chuveiro | Cor do líquido da ampola |
|----------------------------------|--|--|--------------------------|
| 38                               | 57 a 77                                | ordinária  | incolor                  |
| 66                               | 79 a 107                               | intermediária  | branca                   |
| 107                              | 121 a 149                              | alta   | azul                     |
| 149                              | 163 a 191                              | muito alta   | vermelha                 |
| 191                              | 204 a 246                              | extra alta   | verde                    |
| 246                              | 260 a 302                              | altíssima  | laranja                  |
| 329                              | 343                                    | altíssima  | laranja                  |

Segundo BRETANO (2007) as temperaturas de sensibilidade variam em torno de 68° C até 141° C. Quando a temperatura é atingida o bulbo se rompe dando passagem de água ao esguicho.

Conforme cita (GONÇAVES; OLIVEIRA, 2007) existem cinco classificações de sistemas automáticos: Sistema de tubulação molhada, sistema de tubulação seca, sistema de ação prévia, sistema dilúvio e sistema combinado de tubulação seca e ação prévia. A seguir são detalhados os principais tipos desses sistemas.

Os sistemas de tubulação molhada utilizam chuveiros alimentados diretamente com água, uma válvula de alarme é acoplada à saída de forma que sinalize um começo de incêndio. São empregados onde não há risco de congelamento da água.

O sistema de tubulação seca utiliza uma alimentação primária a ar comprimido ou nitrogênio nos chuveiros automáticos, após o acionamento, o ar comprimido ou nitrogênio é liberado abrindo uma válvula de tubo seco que permite a admissão de água no sistema. Tal tipo de sistema é aplicado em regiões de baixa temperatura.

Para sistemas de ação prévia o funcionamento é similar ao de tubulação seca, porém existe um sistema de detecção em paralelo que é muito mais sensível, fazendo com que as válvulas de tubo seco sejam abertas antes da detecção do incêndio pelo sistema principal. A principal diferença para um sistema de tubulação seca é que a válvula de suprimento atua, neste caso, independente da abertura dos chuveiros disparando um alarme, proporcionando uma resposta mais rápida no combate ao incêndio.

Os sistemas automáticos de combate a chamas, conforme citado por BRETANO (2007), são considerados os mais indicados, de forma geral, porque além de ser acionado

automaticamente, dá um alarme geral na edificação, atua sobre o fogo de uma forma efetiva, independente do calor, da fumaça e da visibilidade no local do incêndio.

### **3.4. Comunicação TCP/IP e Bluetooth**

#### Comunicação TCP/IP

TCP/IP é, segundo MAESTRELLI *et al* (2000), um padrão de comunicação que reúne um conjunto de protocolos, tais como: TCP, IP, FTP, TELNET, ICMP, ARP e NFS. Inclusive reúne os principais protocolos que designam seu nome o TCP (Transmission Control Protocol) e o IP (Internet Protocol) O TCP/IP é atualmente o protocolo mais utilizado no mundo, tal fato deve à popularização da Internet, a rede mundial de computadores.

Outro fator que contribuiu com a popularização do TCP/IP é que o mesmo possui arquitetura aberta, isto é, qualquer fabricante pode adotar a sua própria versão do protocolo em seu sistema operacional. Assim, o TCP/IP permite a transmissão de dados entre máquinas com diferentes arquiteturas.

#### Comunicação Bluetooth

Bluetooth é um padrão global de comunicação sem fio de curto alcance, apresenta baixo consumo de energia, é robusto e barato; permite a transmissão de dados no modo *full-duplex* entre dispositivos compatíveis com a tecnologia, tais como: celulares, computadores, fones de ouvido, teclado, mouse, etc. A transmissão de dados é feita por ondas de rádio-frequência, permitindo que um dispositivo detecte o outro independentemente de sua posição, desde que dentro do limite de alcance. Segundo ALECRIM (2008), a velocidade de comunicação é baixa, de até 1Mbps e há 3 classes de operação para o Bluetooth: Classe 1 (até 100 m); Classe 2 (até 10 m) e Classe 3 (até 1 m).

Segundo ALECRIM (2008) o Bluetooth é uma tecnologia criada para operar no mundo inteiro, logo é necessário uma frequência de rádio aberta e padrão no mundo todo, para tanto é utilizada como faixa de operação ISM (Industrial, Scientific, Medical), uma frequência aberta em todos os países que vai de 2,4 GHz a 2,5 GHz. Como o Bluetooth utiliza uma faixa aberta de comunicação é necessário garantir a integridade da informação transmitida, portanto utiliza-se um esquema de transmissão denominado FH-CDMA

(Frequency Hopping – Code-Division Multiple Access) que consiste, de modo simples, na divisão da frequência de comunicação em vários canais.

### 3.5. NXT Lego e Linguagem LeJOS

O NXT, ou NXT brick, é a central microprocessadora do kit lego MINDSTORM. Segundo (NXT Intelligent Brick, 2011) [sitio lego Mindstorm], o NXT tem uma capacidade de processamento de 32 bits, utiliza um processador do tipo ARM 7 com suporte a Bluetooth e USB. O microprocessador é responsável por ditar todas as funções do robô montado, isto é, é o cérebro do robô. Permite a leitura de diversos sensores como: sensor de luz, sensor de distância, sensor de som e aciona até três servos-motores.

O kit padrão acompanha um software de programação baseado em programação por ícones (icon-based) denominado NXT-G. O software é bastante intuitivo facilitando o primeiro contato para usuários inexperientes. Porém, segundo (FERRARI; FERRARI; ASTOLFO, 2007), o NXT Brick permite programação baseada em outros paradigmas tais como JAVA e uma linguagem que mimetiza C denominada NBC/NXC (Next Byte Codes / Not eXactle C), permitindo explorar ao máximo os recursos do kit Lego Mindstorm.

Neste projeto adotou-se a linguagem JAVA que, para o kit Lego Mindstorm é habilitada pela biblioteca LeJOS. O conjunto LeJOS, segundo (LEJOS – Java for LEGO Mindstorm, 2009) [sitio Lejos Org], acompanha uma pequena máquina virtual, bibliotecas denominadas API da linguagem padrão JAVA e classes do próprio NXT conhecido como NXJ. Para que o NXT interprete linguagem JAVA é necessário alterar o firmware padrão, trata-se do sistema operacional do NXT, que gerencia todas suas funções como carregamento de programas, exclusão, leitura de arquivos etc.

O novo firmware permite o carregamento de programas JAVA na máquina virtual interna (Tiny Virtual Machine). A linguagem JAVA trabalha com o conceito de Máquina virtual (virtual machine), seu próprio sistema de máquina virtual é conhecido como JVM – Java Virtual Machine. Segundo (GOODRICH; TAMASSIA, 2007), o código compilado em JAVA (JAVA *bitcode*) é uma seqüência de códigos binários que definem as instruções para a JVM. A máquina virtual é um programa interpretador de JAVA *bitcode*, assim um código

Java pode ser executado (emulado) em qualquer computador, tal como um computador pessoal ou um servidor.

### **3.6. Controle de Sistemas Dinâmicos**

Sistemas dinâmicos são classificados segundo LATHI (2007) como sistemas com memória, isto é, são sistemas cuja saída é função da entrada atual e da entrada num instante passado. Os sistemas dinâmicos são descritos através de equações diferenciais.

Sistemas de controle são combinações de componentes que atuam em conjunto para realizar o objetivo de controlar outros dispositivos ou componentes ou, até mesmo, controlar a si próprio.

O controle automático, segundo OGATA (2010), é essencial em qualquer campo da engenharia e da ciência. O controle automático é um componente importante e intrínseco, por exemplo, em sistemas de veículos espaciais, sistemas robóticos, modernos sistemas de manufatura, etc.

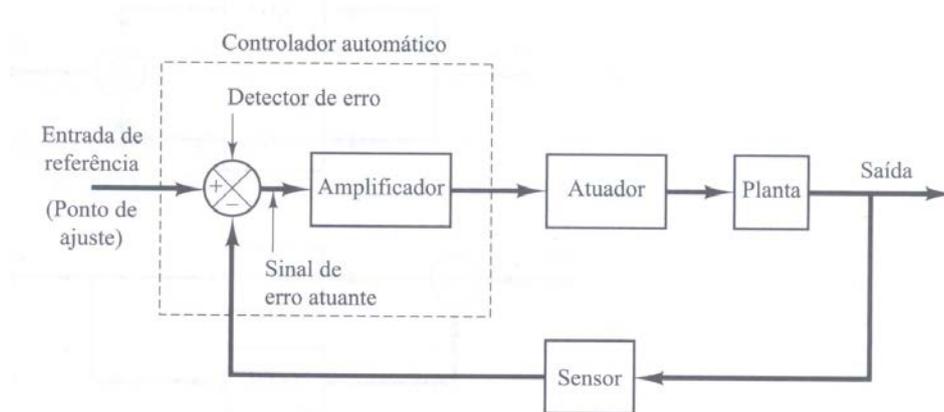
O conceito de controle com realimentação é importante para os sistemas de controle linear, segundo OGATA (2010), um sistema que estabeleça uma relação de comparação entre a saída e entrada de referência, utilizando a diferença como meio de controle, é denominado sistema de controle com realimentação. Os sistemas de controle com realimentação são, com frequência, denominados de sistemas de controle de malha fechada. Em um sistema de controle de malha fechada, o sinal de erro atuante, que é a diferença entre o sinal de entrada e o sinal de realimentação (que pode ser o próprio sinal de saída ou uma função do sinal de saída e suas derivadas e/ou integrais), realimenta o controlador, de modo a minimizar o erro e acertar a saída do sistema ao valor desejado.

Os sistemas ditos de malha aberta são, conforme OGATA (2010), aqueles onde o sinal de saída não exerce nenhuma ação de controle no sistema. Isso quer dizer que o sinal de saída não é medido nem realimentado para comparação com a entrada. Assim, a cada entrada de referência corresponde uma condição fixa de operação. A precisão do sistema depende de uma calibração.

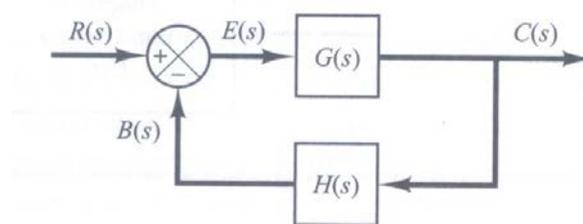
Segundo OGATA (2010) a maioria dos controladores industriais pode ser classificada, de acordo com suas ações de controle, em:

- Controladores de duas posições ou on-off
- Controladores proporcionais
- Controladores integrais
- Controladores proporcionais-integrais
- Controladores proporcionais-derivativos
- Controladores proporcionais-integrais-derivativos (PID)

Na engenharia de controle, para expressar as funções dos diversos componentes de um sistema de controle é comumente utilizado o diagrama de blocos. Trata-se de uma representação gráfica das funções desempenhadas por cada componente e do fluxo de sinais entre eles. Segundo OGATA (2010) esses diagramas descrevem o inter-relacionamento que existe entre os vários componentes. Diferindo da representação matemática abstrata pura, um diagrama de blocos tem a vantagem de indicar de modo mais realístico o fluxo de sinais do sistema real.



(a)



(b)

**Figura 3 – (a) Diagrama de bloco de um sistema de controle industrial - (b) Representação simplificada do sistema de malha fechada utilizando funções de transferência. [OGATA (2010)]**

A figura 3 (a) ilustra um exemplo de diagrama de blocos de um sistema de controle realimentado. As ações dos atuadores, planta e sensor são descritas de modo matemático por funções de transferência descritas no domínio da frequência. Uma forma simplificada da representação de diagramas de blocos de sistemas fechados é exibida na figura 3 (b) Nesse diagrama, caso  $H(s)$  seja unitário então o sistema é um caso particular de realimentação unitária.

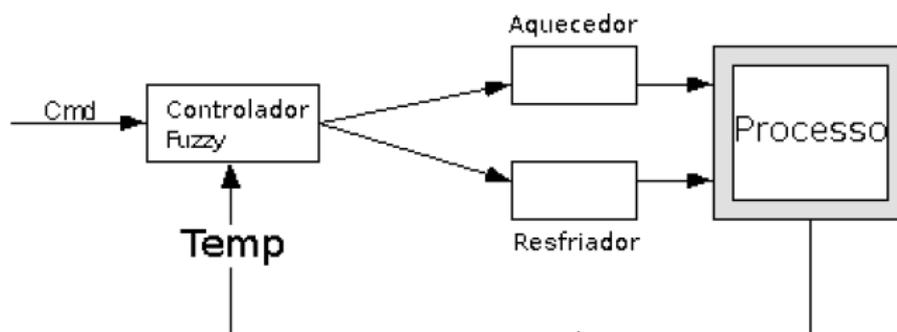
### 3.7. Lógica Nebulosa

Segundo JUNGES (2006), A lógica nebulosa ou *Fuzzy* é baseada na teoria dos conjuntos nebulosos. Tradicionalmente, uma proposição lógica tem dois extremos: ou é 100% verdadeiro (1 - um) ou é 100% falso (0 - zero). Entretanto na lógica nebulosa, uma premissa varia em grau de verdade de 0 a 1, o que leva a ser parcialmente verdadeira ou parcialmente falsa.

O controle baseado em *fuzzy* visa imitar um comportamento baseado em regras, ao invés de utilizar modelos matemáticos, tais como equações diferenciais ordinárias. O objetivo da lógica *Fuzzy* é gerar uma saída lógica através de um conjunto de entradas não precisas. Segundo JUNGES (2006) a lógica *fuzzy* apresenta as seguintes características:

- Robustez, pois não requer entradas precisas
- Facilmente modificável, pois é baseada em regras
- É uma forma de controle não-linear sem modelos matemáticos
- É a solução mais rápida e barata em alguns casos
- Facilmente implementável

Em resumo a lógica *Fuzzy* visa fornecer a um sistema informações significativas ao invés de informações numéricas. Um exemplo a seguir é um controlador *Fuzzy* de temperatura, conforme a figura 4.



**Figura 4 – Esquema de um Controlador *Fuzzy***

O controlador toma a decisão de aquecer ou esfriar de acordo com a entrada *Cmd*. A realimentação de temperatura visa medir o erro do processo. A saída do controlador simplesmente seriam 3 estados: Aquecer, esfriar ou manter. É possível, por exemplo, fornecer uma tensão negativa quando é necessário resfriar ou uma tensão positiva quando oposto, e uma tensão nula para manter a temperatura. O controlador fornecerá a saída baseado na diferença  $cmd + temp$  ou  $cmd - Temp$  que varia de acordo com um conjunto de regras implementadas no controlador para decidir se é muito quente ou muito frio.

#### **4. METODOLOGIA**

Visando utilizar ferramentas de prototipagem já disponíveis e de baixo custo foi implementado um protótipo do sistema robótico inteligente de combate a incêndio utilizando-se:

- Kit Lego Mindstorm NXT – Motores para atuadores, estrutura mecânica do braço robótico e sistema de controle passivo;
- Controle remoto do vídeo-game Nintendo Wii (wii remote ou wiimote) – Tal dispositivo contém uma câmera CCD IR e chip Bluetooth de comunicação o que permite integração com uma estação de trabalho (computador);
- Programas (softwares) – Foram desenvolvidos ou modificados em linguagem de programação JAVA, LeJOS (biblioteca do JAVA para o Lego NXT) e C#; para comunicação, integração e controle automático do sistema.

#### **4.1. Módulos de Programação**

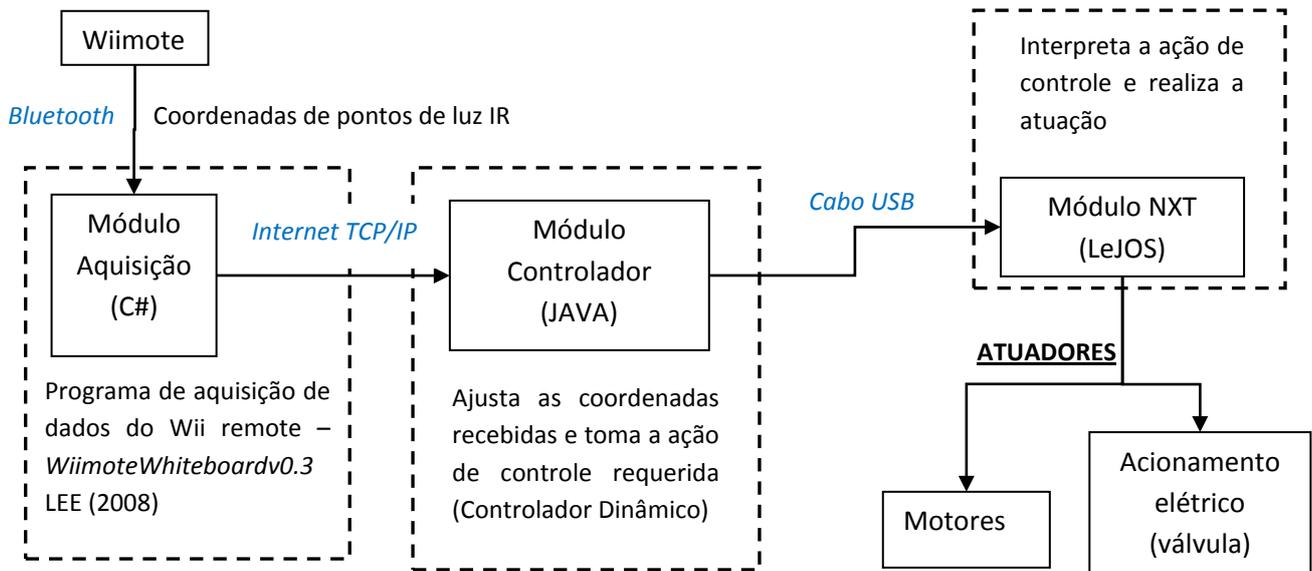
Os programas computacionais de comunicação e controle foram divididos em três módulos: Módulo de Aquisição, módulo Controlador e módulo NXT.

O módulo de aquisição é responsável por transmitir os dados do controle remoto Nintendo wii para um ambiente desktop (Personal Computer). Para tanto foi utilizado como base o programa WiimoteWhiteboard v0.3 desenvolvido em linguagem de programação C# por LEE (2008), o programa está disponível sob licença Freeware. Modificações foram feitas para reduzir os comandos apenas aos úteis para este projeto, como para o envio das informações captadas pela câmera IR via Streaming de comunicação TCP/IP. Ou seja, este módulo despeja as informações coletadas pela câmera do wiimote num endereço de IP (Internet Protocol) podendo ser captado por outro programa no mesmo computador ou remotamente.

O módulo controlador central faz toda a integração entre sensor e atuador. Os dados enviados via TCP/IP são coletados no endereço e porta especificado pelo servidor (módulo de aquisição). Nesse módulo foi criada uma interface gráfica GUI para interação com o usuário. Os dados da câmera IR são tratados como coordenadas de pontos de luz infra-vermelho, os pontos são reajustados para uma resolução menor para imprimir na tela (da interface GUI) sua posição relativa, estes dados são processados e a ação de controle necessária é enviada ao módulo NXT.

O módulo NXT é o programa base que roda dentro do NXT Brick (microprocessador do Lego NXT), isto é, deve ser carregado dentro do NXT independente dos outros módulos. Este módulo é responsável por interpretar a ação de controle do módulo Controlador e realizar a atuação mecânica necessária, acionando os servos-motores e o sistema extintor. O programa foi desenvolvido na linguagem LeJOS, uma API do JAVA específica para o kit Lego Mindstorm. A comunicação entre o módulo controlador e o módulo NXT é feita através de uma porta USB (Universal Serial Bus).

O diagrama da figura 5 resume todos os módulos de programação destacando a forma de comunicação entre eles.



**Figura 5 – Resumo dos módulos de programação**

#### 4.2. Estrutura do Protótipo

O braço mecânico construído foi baseado na figura 6.



**Figura 6 – Projeto utilizado como referência [nxtprograms.com (2008)]**

O braço mecânico tem 2 graus de liberdade, podendo se deslocar na direção horizontal e na direção vertical. Na extremidade do braço foi construído um suporte para fixar o controle Nintendo Wii, o sensor deste projeto. Logo abaixo, outro suporte foi criado para fixação do dispositivo atuador – uma mangueira flexível para esguicho de água.

Um suporte externo em madeira foi construído para fixação de todo o sistema, o suporte apresenta guias e escoras para as mangueiras do sistema extintor, espaço para fixação

do NXT e do braço robótico e espaço para acoplar um mini-notebook que será utilizado para executar os programas necessários (módulos de programação).

### 4.3. Sistema Extintor

Os seguintes materiais foram utilizados para elaboração do sistema extintor:

- Garrafa PET de 3 litros
- Válvula solenóide NF de máquina de lavar (Acionamento em 110 Vac)
- Relé NA/NF acionado em 9 Vdc
- Mangueiras de 1/2" e 3/4" de diâmetro
- Mangueira de aquário ( $\frac{1}{16}$ " de diâmetro)
- Abraçadeiras metálicas de 1/2" e 3/4" de diâmetro
- Seringa hospitalar sem agulha

O sistema extintor construído é baseado na lei de Pascal da hidrostática, onde qualquer variação de pressão exercida sobre um fluido em equilíbrio hidrostático transmite-se integralmente a todos os pontos de fluido e às paredes do recipiente que o contém.

No sistema extintor projetado o recipiente de armazenamento de água é uma garrafa PET de 3 litros, a pressão é aplicada externamente à garrafa por meio de algum tipo de carga (peso) sobre ela. A garrafa está conectada à entrada da válvula solenóide através das mangueiras de diferentes diâmetros, na saída da válvula há uma redução do diâmetro da mangueira para engate da mangueira de aquário, desta forma o sistema ganha pressão permitindo jatos mais potentes, na ponta da mangueira de aquário foi acoplado um bico de seringa hospitalar que permite jatos mais finos. O acionamento da válvula solenóide é controlado por uma porta de motor do kit Lego Mindstorm, a porta fornece 9 V quando está ligada, para tanto, um relé faz o acionamento do circuito auxiliar em 110 Vac necessário para o acionamento da válvula de máquina de lavar.

#### 4.4. Controle dinâmico e Sistemas de Comunicação

O sistema de controle é responsável por ditar a quantidade de deslocamento necessária em cada eixo (horizontal e Vertical), assim como controlar a velocidade e a força dos motores do braço. Uma quantidade foi definida para cada eixo como a diferença entre a coordenada do ponto IR ao centro de acerto (coordenadas fixas em 236px por 172px), essa quantidade denominada  $\delta_i$  é o erro do ponto de coordenada  $i = x$  ou  $y$  com relação ao centro de acerto de mesma coordenada, logo:

$$\delta_i = \text{CoordenadaIR}_i - \text{centro}_i$$

Foram construídos três tipos de controlador. O primeiro baseado em lógica nebulosa, ou seja, atribui valores de deslocamento fixo e cada vez maiores conforme mais distante o ponto de luz IR está do centro de acerto. Um segundo método utiliza um controle proporcional que relaciona uma taxa de deslocamento do motor (em graus) com a variação de pixel (px – medido pela interface gráfica). Esta relação foi obtida através de ensaios.

$$G = \frac{\Delta \text{ graus}}{\Delta \text{ pixel}}$$

O parâmetro G foi obtido num ensaio com deslocamento fixo de 100 px, logo o motor de cada eixo deve deslocar

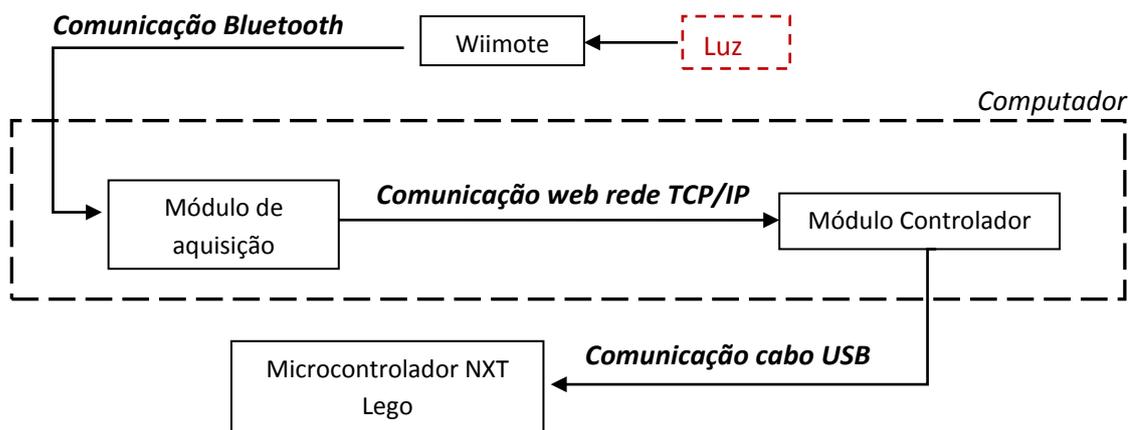
$$\frac{G}{100} \times \delta_i$$

O último tipo de controle é um modelo de controle PD (proporcional-derivativo), onde a quantidade a ser deslocada, aqui chamada de  $e_{i,t}$ , é definida como:

$$e_{i,t} = \delta_i \times (G_0 + G(t))$$

No controle PD, para cada eixo, a quantidade a ser deslocada depende de uma constante de proporcionalidade  $G_0$  e uma taxa dinâmica  $G(t)$  que é dada pela derivada do erro ( $\delta$ ).

A integração dos módulos é feita através do programa em JAVA denominado Controller, trata-se do módulo controlador central. O seguinte diagrama resume as trocas de informações que ocorrem no sistema e os sistemas de comunicação empregados.



**Figura 7 – Comunicação entre os módulos**

Os sistemas de comunicação existentes, tais como: Bluetooth, rede TCP/IP e cabo USB são ferramentas que o módulo controlador (JAVA) utiliza para aquisição e transmissão dos dados.

#### **4.5. Testes e parâmetros do sistema**

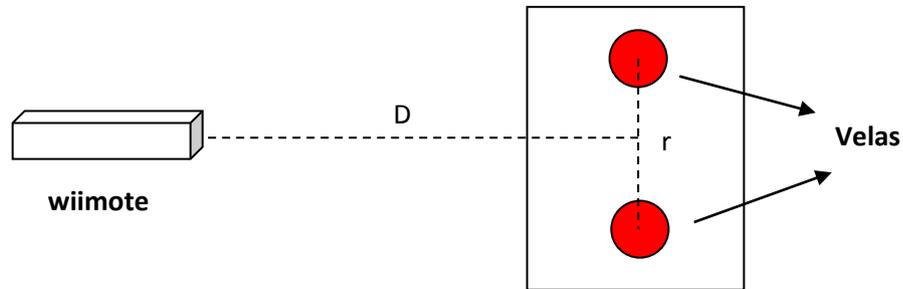
Após a montagem do protótipo e a configuração dos sistemas de controle foram elaborados dois principais testes: Teste de alcance de detecção e teste de velocidade de controle, a fim de coletar algumas informações do protótipo e da câmera IR.

Por fim, após implementação do sistema extintor, outros testes foram feitos para avaliar a eficiência desse sistema, coletando dados de alcance do jato de água e velocidade de extinção de fogo.

##### **4.5.1. Teste de alcance de detecção**

O teste foi dividido em dois ensaios um para detecção da distância em profundidade máxima e outro para definir o campo de visão do sistema. Basicamente foi medida a primeira detecção com uma fonte de luz IR proveniente do infinito, isto é, de uma distância onde a câmera não consegue detectar, então a fonte foi deslocada até que a câmera conseguisse detectar um foco de IR, na iminência de detecção foi medido a distância entre a fonte de luz e o wiimote, a média dessa distância foi definida como distância máxima em profundidade.

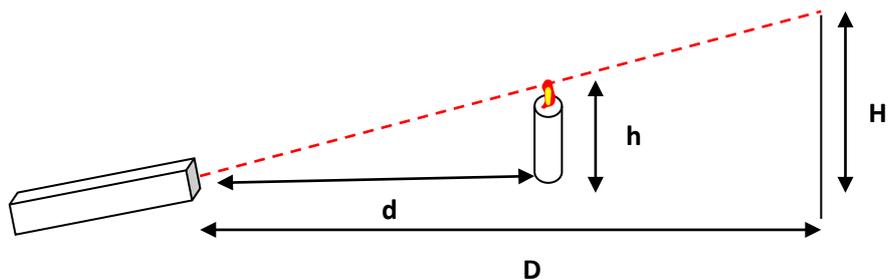
No segundo teste foram obtidas as distâncias máximas horizontais e verticais do sistema permitindo reconstruir o campo visual da câmera de IR. Primeiro foi construído um aparato conforme a figura 8 que permitiu medir a distância máxima horizontal.



**Figura 8 – Aparato experimental: Teste de visão horizontal**

Conforme a figura 8 as velas foram dispostas equidistantemente, o wiimote foi posicionado numa distância  $D$  tal que os pontos IR das velas estivessem sempre nos extremos do painel do programa de controle que exibe a interface gráfica dos pontos de luz infravermelho. Para diferentes valores de  $D$  foram tomados diferentes valores de  $r$ , sendo que a média da distância  $r$  foi denominada alcance horizontal máximo.

Para determinar o alcance máximo vertical outro aparato experimental foi montado, conforme ilustrado na figura 9.



**Figura 9 – Aparato experimental: teste de visão vertical**

O wiimote foi posicionado, de forma que o ponto de luz IR apareça na extremidade superior da interface gráfica do programa computacional. Com o auxílio de uma caneta-laser e uma trena a distância  $H$  foi medida, também foram medidos as distâncias  $d$  e  $D$ . Por meio de semelhança de triângulos é possível obter o valor de  $h$  pela equação:

$$\frac{D}{d} = \frac{H}{h}$$

Para várias distâncias de  $H$  foram obtidos um conjunto de valores de  $h$ , a média de  $h$  foi denominada alcance vertical máximo.

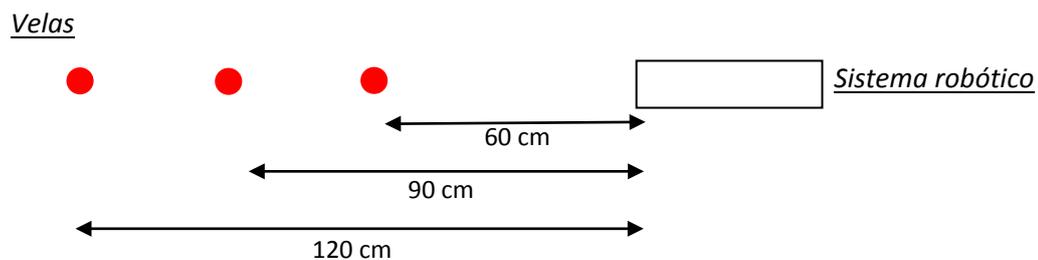
#### 4.5.2. Teste de velocidade de controle

Para cada tipo de controle foram feitos 6 ensaios de detecção, onde a fonte de luz IR estava posicionada aproximadamente a  $90^\circ$  em relação ao wiimote. O programa de controle foi modificado para parar o braço mecânico somente após 3 tentativas de centralizar o foco de luz IR, logo a rotina de centralização é realizada no mínimo 3 vezes para evitar pontos não centralizados. Para cada ensaio é contabilizado o tempo de deslocamento do ponto inicial  $s_0$  até o ponto final  $s_f$  onde o braço está com a fonte de luz IR centralizada.

#### 4.5.3. Testes com o sistema extintor

Um teste de alcance do jato de água foi feito comparando o sistema extintor sem ajuste e com ajuste, avaliando a melhor configuração do sistema extintor de forma que o sistema seja mais eficiente possível. Esses ajustes foram divididos em duas categorias: Ajustes na programação e ajustes na estrutura.

O teste consiste em medir o tempo que o sistema leva para apagar fontes de fogo (velas) dispostas em diferentes distâncias, a ilustração da figura 10 ajuda a interpretar o teste.



**Figura 10 – Ilustração do teste de alcance do jato de água**

O tempo foi contabilizado a partir do momento que o sistema detectou a fonte de luz IR, ou seja, não foi considerado o tempo que o sistema leva para buscar e detectar o fogo.

Um segundo teste foi realizado para avaliar a abertura do spray de água e a melhor distância de combate do sistema extintor já ajustado e configurado. O teste consiste em medir o tempo necessário para apagar duas fontes de luz próximas uma da outra de 5 cm, os tempos

foram coletados para duas distâncias do sistema robótico para as velas: de 50 cm e 90 cm. Novamente, os tempos somente são contabilizados quando o sistema detecta a fonte de luz IR.

## **5. RESULTADOS E DISCUSSÕES**

### **5.1. Sistemas de Controle e Comunicação**

Os três módulos de programação são responsáveis pelas funcionalidades do sistema, tais como: aquisição de dados, processamento, transmissão de dados e atuação mecânica.

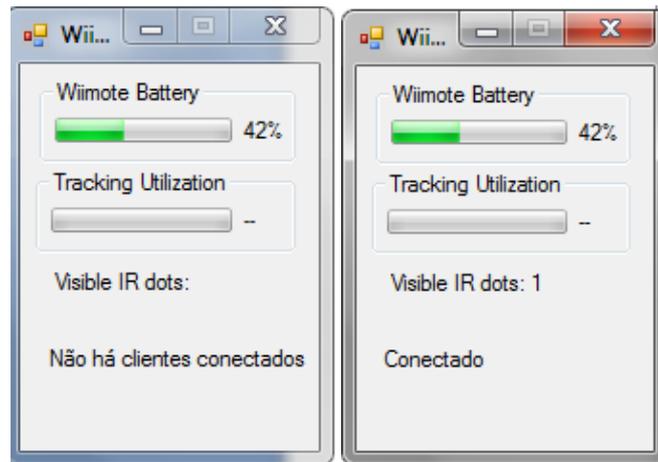
#### *5.1.1. Programa de aquisição (Wiimote)*

Foi desenvolvido um software de aquisição dos dados do controle do Nintendo Wii para um computador (Desktop), utilizou-se como base o programa Wiimote WhiteBoard v0.3 criado por LEE (2008). As principais modificações foram:

- Remover métodos de correção de coordenadas;
- Limpar itens indesejados da interface
- Criar uma streaming de comunicação TCP/IP

A comunicação TCP/IP foi utilizada para que o programa controlador central, que foi desenvolvido em outro paradigma de programação (JAVA), pudesse efetuar a leitura dos dados do Wiimote pelo programa em C# sem a necessidade de armazenamento de dados, pois a tecnologia de *Streaming* de pacotes de comunicação permite a transmissão em tempo real (On-Line) através de uma conexão de Internet no mesmo computador ou remotamente. A interface do programa final é exibido na figura 11.

Na interface, conforme figura 11, são exibidas informações como o nível de bateria do controle remoto, o número de pontos de luz IR visíveis e se há cliente conectado via TCP/IP. No caso da figura 9 (b) um cliente acessou os dados fornecidos pelo programa.



(a)

(b)

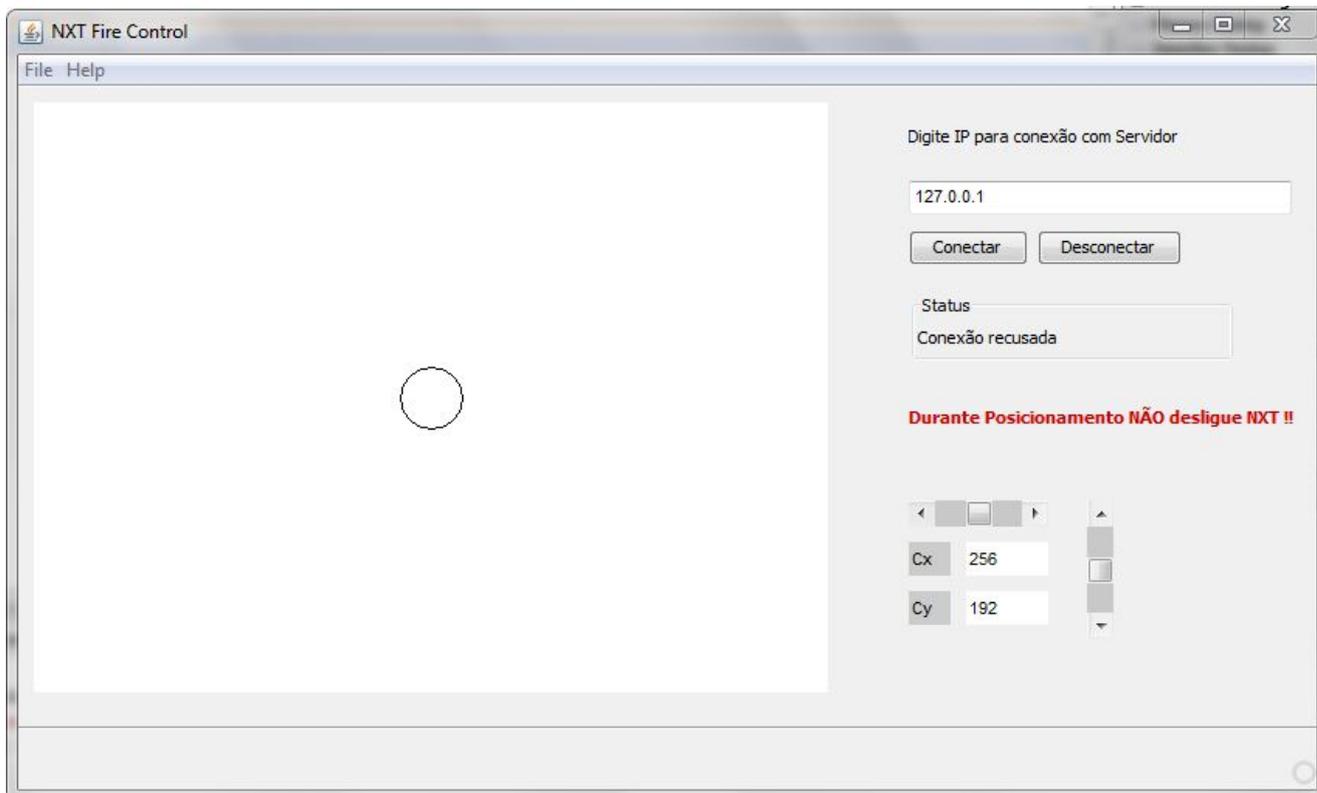
**Figura 11 – Interface gráfica do programa de aquisição (WiimoteWhiteBoard v0.3)**

O programa realiza a função de um servidor de dados, onde despeja os dados das coordenadas de pontos de luz infravermelho provenientes do wii remote no endereço IP especificado. Para acessar os dados basta existir um programa cliente que “escute” o endereço IP padrão 127.0.0.1 na porta 8001. O programa de aquisição de dados deve ser o primeiro programa a ser executado no computador, logo após o pareamento do wii remote com o Bluetooth do computador.

### 5.1.2. Programa Controlador

O módulo controlador é o programa de maior importância, pois nele está implementado toda lógica de controle, a comunicação TCP/IP para o módulo de aquisição, a comunicação por streaming de dados via porta USB para módulo NXT e a interface de comunicação com o usuário GUI (Guide User Interface). A interface gráfica real é exibida na figura 12.

O usuário deve estar com o wiimote conectado via Bluetooth e com o programa do módulo de aquisição em execução, assim é possível estabelecer uma conexão por TCP/IP entre o módulo controlador e o software de aquisição, bastando inserir o endereço IP e clicar no botão de conexão, a conexão pode ser verificada através do “status”.

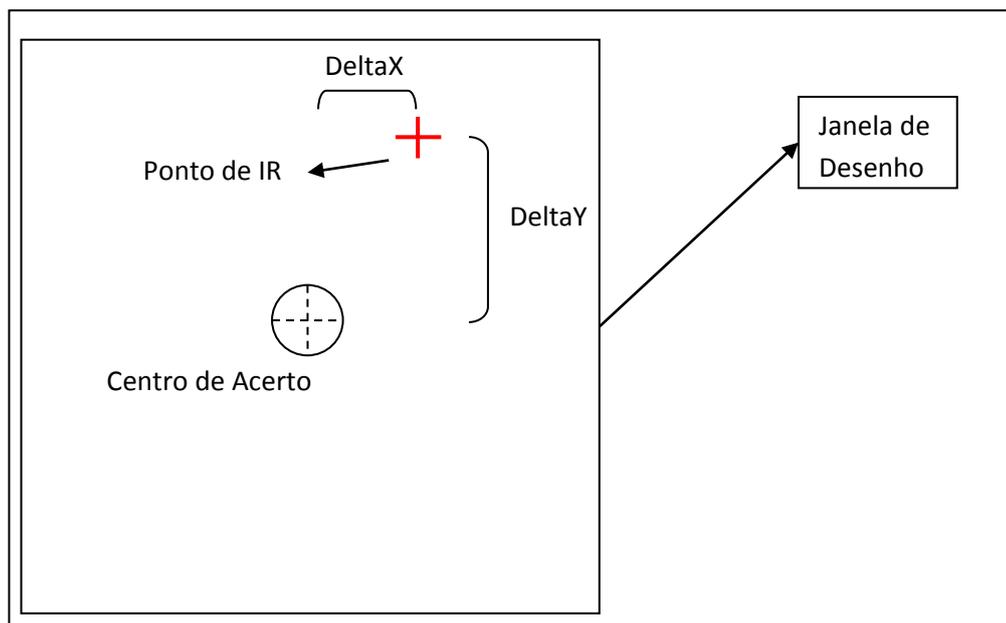


**Figura 12 – Interface GUI do software do módulo controlador**

Assim que o programa se conecta com o módulo de aquisição, aparece na interface a região de acerto válido, isto é, o alvo. A interface apresenta uma tela (retângulo branco na figura 12) de 512 px vs 384 px onde é desenhado dinamicamente os pontos de IR detectados. O centro exato de acerto é a metade do tamanho em X e do tamanho em Y, logo na coordenada (256 px; 192 px), porém o centro de acerto considera uma margem de erro de um raio 20 px, logo a região final de acerto é uma circunferência centralizada em 256 px e 192 px de raio de 20px. Ainda existe na interface GUI dois *slidebar* que indicam as coordenadas do centro de acerto ( $C_x$  e  $C_y$ ), tais coordenadas podem ser modificadas para obtenção de um ajuste fino bastando, para isso, arrastar os *slidebar*. O ajuste é necessário principalmente para melhoria da rotina de combate de incêndio do módulo NXT (seção 7.1.3.).

Quando há leitura de pontos de luz IR proveniente do wiimote, os mesmos são redimensionados para o tamanho da tela de desenho (512 x 384), pois as coordenadas originais da câmera CCD/IR têm resolução de 1024 px por 768 px, os pontos de luz são

desenhados como cruces do tamanho de 10 px, ao passo que são medidos parâmetros das coordenadas redimensionadas para a tomada da ação de controle, conforme o tipo de controle escolhido: *fuzzy*, proporcional ou proporcional-derivativo. Após o processamento, a ação de controle é enviada por streaming via cabo USB para o NXT, para que o programa NXT faça a atuação mecânica necessária. A figura 13 mostra uma representação da interface GUI do módulo controlador quando um ponto de luz IR é detectado, a janela de desenho refere-se a tela de 512px vs 384px. Um resumo da lógica de programação do módulo Controlador é exibido no diagrama na figura 17.



**Figura 13 – Representação da interface gráfica com ponto de luz IR detectado**

### 5.1.3. Programa NXTControl

O módulo NXT, como já dito, é o software carregado no NXT brick do kit lego, foi denominado de NXTControl e foi desenvolvido com auxílio da API LeJOS. O programa NXTControl deve ser inicializado no NXT brick antes do programa Controlador (JAVA).

O programa NXTControl utiliza o recurso de programação *multi-thread*, na programação *multi-thread* é possível executar mais de uma rotina ao mesmo tempo, isto é, realizar várias tarefas simultaneamente, o que se faz necessário na movimentação de manipuladores robóticos. A dinâmica do módulo NXT se resume em duas *threads*. Uma *Thread* é responsável pela comunicação de dados entre o módulo controlador e o módulo NXT, toda comunicação é feita através de Streaming de dados trocados via porta USB. Os dados recebidos via USB são coordenadas de pontos de luz IR provenientes do wiimote e que

foram previamente tratados no módulo controlador (seção 7.1.2). A idéia inicial era realizar um streaming de comunicação via Bluetooth, assim seria necessário somente um cabo de alimentação elétrica para o sistema robótico. Porém, a forma de comunicação foi alterada para conexão pelo cabo USB, devido a problemas de comunicação e integração do sistema Bluetooth JAVA para o Bluetooth do PC.

Na segunda *thread* que é executada simultaneamente, de movimentação e busca, um método de calibragem ajusta os ângulos máximos e mínimos permitidos em cada eixo. Após a rotina de calibração a *thread* entra num laço infinito que contém três etapas: um método de busca de pontos de IR, um método de posicionamento do braço robótico e um método de combate de incêndio.

O método de busca faz com que o braço se desloque num perfil senoidal (“zigue-zague”) no sentido horário, quando um foco de IR é detectado a rotina de busca se encerra, caso contrário a rotina se estende até que o ponto de deslocamento máximo no eixo X (horizontal) seja atingido, então a rotina de busca começa no sentido anti-horário

Após a detecção do foco de IR um método de posicionamento é acionado. O método de posicionamento faz a leitura da ação de controle proveniente do módulo controlador, o método ajusta a força e a velocidade dos motores e realiza o ajuste da posição necessária de acordo com a realimentação do erro das coordenadas.

Com o braço posicionado e centralizado no alvo do incêndio o programa aciona o método de combate que consiste em: acionar a válvula solenóide, permitindo passagem de água para o bico ejetor, e inclinar o braço num determinado ângulo realizando movimentos de zigue-zague no eixo horizontal, tal movimentação do braço permite que o jato atinja uma pequena área, ao invés de um único ponto, o que aumenta a eficiência de combate.

Os sistemas controladores foram implementados no módulo controlador, para evitar processamento excessivo no NXT, logo, o módulo NXT faz o controle passivo recebendo do módulo controlador um vetor de números inteiros com duas posições que se referem diretamente à quantidade que cada eixo ( $X$  e  $Y$ ) deve girar, o sentido da rotação é dado pelo sinal do inteiro. Somente para o controle Proporcional-derivativo toda lógica é implementada diretamente no NXT, isso se deve à realimentação tacométrica necessária, ou seja, da realimentação da posição do motor em cada incremento do código de controle. A realimentação é necessária para se obter a derivada do erro.

O ajuste de velocidade utiliza um algoritmo obtido empiricamente, onde as velocidades dos motores são definidas como um ganho de acordo com a quantidade a ser movimentada que é enviada pelo módulo controlador. Como exemplo, a quantidade a ser deslocada no eixo X, que é enviada pelo módulo controlador pela streaming USB, é denominada no código como *deltaX*. Então a regra de velocidade para o motor do eixo X foi definida como:

$$v_x = |\textit{deltaX}| \times 1,52$$

Para a velocidade do motor do eixo Y foi definido:

$$v_y = |\textit{deltaY}| \times 1,74$$

As relações 1,52 para X e 1,74 para Y foram obtidas empiricamente através de diversos ensaios até se obter uma velocidade ideal para os três tipos de controle implementados.

#### 5.1.4. Controladores Dinâmicos

Nos métodos de controle, primeiramente é definido um número inteiro como a diferença do centro de acerto até a coordenada atual do ponto de IR, tal grandeza representa o erro da coordenada do eixo com relação à mesma coordenada da posição do centro de acerto:

$$\textit{delta}_i = c_i - \textit{coordRendenizada}$$

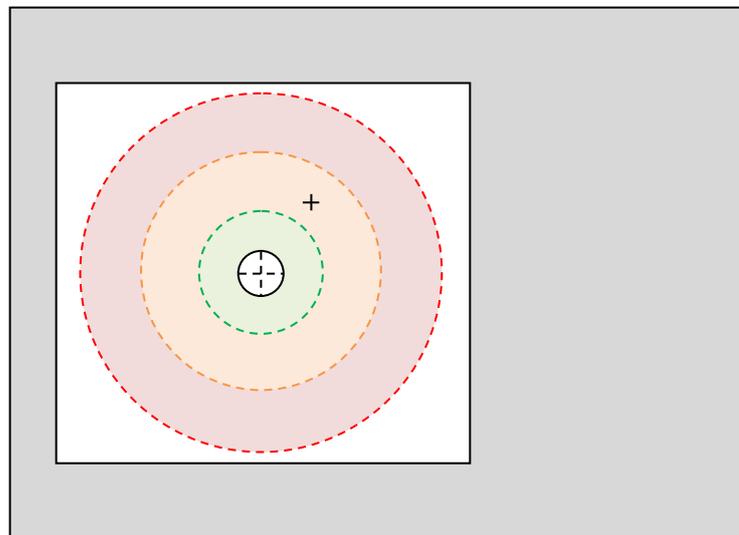
Onde *i* pode ser *x* ou *y* dependendo do eixo que esta sendo tratado no momento (Vide figura 13). A variável *coordRendenizada* é uma matriz (3x2) dos três possíveis pontos de IR já redimensionado para o tamanho da tela de desenho, sendo que, se houver somente um foco de IR os pontos 2 e 3 são zeros.

A proposta básica dos controladores é fazer com que o braço se desloque da quantidade do erro (*delta*) existente até o alvo, assim, ao final do deslocamento, o braço estaria posicionado no centro de acerto.

O controlador do tipo *Fuzzy* responde ao valor de  $\textit{delta}_i$  ( $i = x$  ou  $y$ ) conforme a proximidade do valor do mesmo com a coordenada do centro, ou seja, a resposta do controlador foi dividida em 4 faixas de valores, quanto mais distante o ponto de Luz IR está do centro de acerto, maior é o valor de  $\textit{delta}_i$  e maior é o valor enviado como ação de controle, ou seja, maior é a quantidade enviada ao módulo NXT para movimentação dos

motores. Por exemplo, para pontos IR com coordenadas em X maiores que 170 pixel o controlador envia uma resposta ao módulo NXT de 55 que indica a quantidade em graus que o motor do eixo X (horizontal) deve ser rotacionado. A figura 14 ilustra graficamente as faixas de resposta do controlador *Fuzzy* na tela de desenho da interface GUI do módulo controlador.

As faixas de resposta do controlador *Fuzzy* não são exibidas para o usuário na interface, a figura 14 é meramente ilustrativa. No exemplo da figura 14 o ponto de luz IR está localizado na região da circunferência laranja, tal região está na faixa 2 e tem como resposta o valor de 23° para rotação dos motores. Um resumo das faixas de resposta do controlador *Fuzzy* é exibido na figura 17 que apresenta um diagrama resumo de todos os controladores.



**Figura 14 – Representação das faixas de resposta do controlador *Fuzzy* na interface GUI do módulo Controlador**

No controle do tipo Proporcional foi utilizado um método de controle clássico. Aplicar uma taxa que relacione a quantidade em graus de rotação do motor por unidade de pixel. Para se obter essa taxa foram feitos testes com o protótipo para o mesmo se deslocar unilateralmente por uma distância, na tela de desenho, de 100px. O teste foi feito contabilizando a quantidade de rotação em graus que o motor levou para se deslocar dessa quantidade de pixel, logo, a taxa denominada  $G_0$  seria a quantidade rotacionada pelo motor dividido por 100 px. A tabela 2 resume os resultados obtidos no teste, foram feitos 11 ensaios onde o de maior valor foi descartado.

Tabela 2 – Ensaio para obtenção do parâmetro  $G_0$

| Ensaio | Graus | Ensaio       | Graus       |
|--------|-------|--------------|-------------|
| 1      | 40    | 7            | 42          |
| 2      | 81    | 8            | 46          |
| 3      | 40    | 9            | 49          |
| 4      | 48    | 10           | 43          |
| 5      | 78    | 11           | 44          |
| 6      | 79    | <b>Média</b> | <b>50,9</b> |

Assim o parâmetro foi definido como:

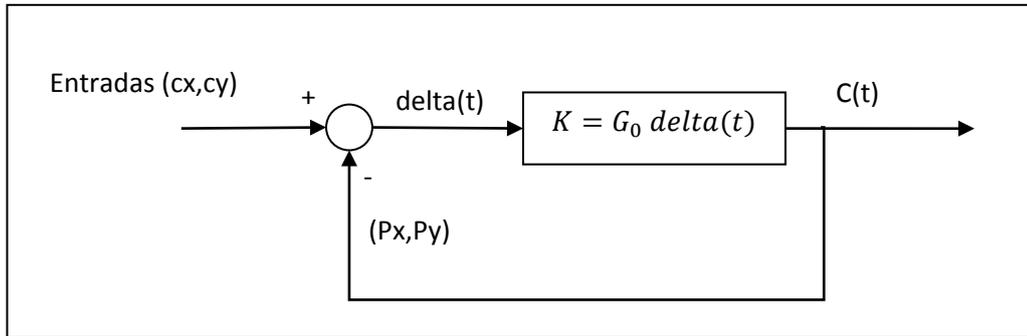
$$G_0 = \frac{50,9}{100} \cong 0,50 \text{ rot/pixel}$$

O controlador proporcional envia por USB como ação de controle o produto do erro ( $\delta_i$ ) com o parâmetro  $G$ , ou seja:

$$\delta_i \times G_0$$

Foi feito um ajuste fino no controlador proporcional onde é utilizado 3 valores de  $G_0$ : 0,49; 0,47 e 0,45 cada uma para uma certa faixa de  $\delta_i$ , o valor de  $G_0 = 0,5$  foi abandonado pois não se ajustava de forma ideal à região de acerto.

O diagrama de bloco da figura 15 ajuda no entendimento desse controlador.  $\delta(t)$  é a diferença entre as coordenadas da entrada (pontos do centro – definidos como  $cx$  e  $cy$ ) pelas coordenadas do wiimote ( $px, py$ ), ou seja,  $\delta(t)$  é o erro das coordenadas ( $px, py$ ) na aproximação pelas coordenadas do centro ( $cx, cy$ ). A saída do sistema foi representada na figura como  $C(t)$ . O controlador utiliza uma realimentação unitária do sistema, isto é, nenhuma função controla o sinal de saída que realimenta negativamente o sistema.



**Figura 15 – Diagrama de bloco do controlador Proporcional**

Para o último tipo de controle, o PD (proporcional-derivativo) toda a lógica de controle foi implementada no programa NXT, o programa controlador apenas envia para o NXT o valor do erro das coordenadas com relação ao centro, ou seja,  $delta_i$ . O controle PD implantado é baseado no controlador proporcional-derivativo clássico, isto é, consiste em utilizar a taxa de variação do erro (derivada) como um sistema paralelo ao controlador proporcional. A lógica final implementada foi movimentar cada eixo em uma quantidade definida como o produto de  $delta_i$  por  $G_0$  somado ao produto de  $delta_i$  com  $G(t)$ , resumindo, a saída  $C$  do sistema é:

$$C = delta_i \times G_0 + delta_i \times G(t) = delta_i \times [G_0 + G(t)]$$

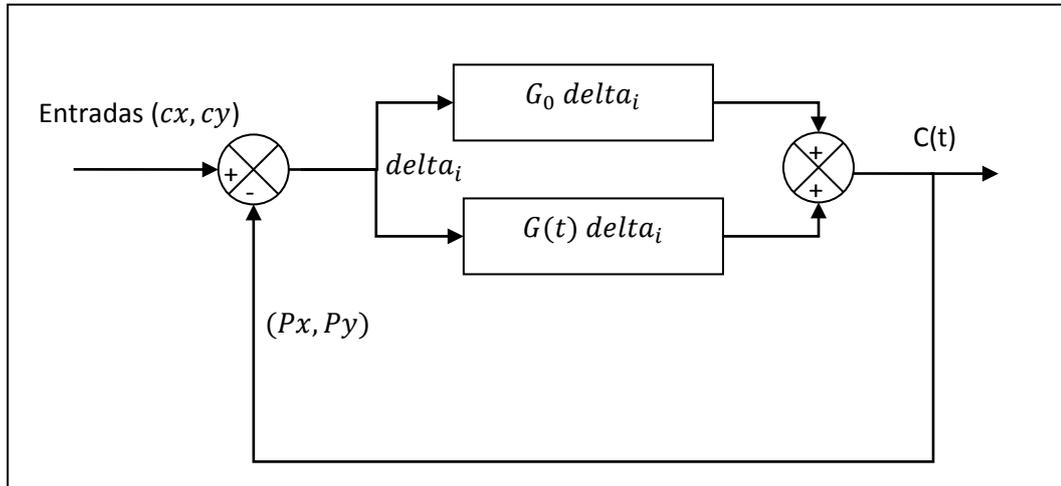
$$C(t) = delta_i [G_0 + G(t)]$$

$G_0$  é a mesma taxa do controlador proporcional, aqui definido como 0,48. O  $G(t)$  é a taxa dinâmica de variação da quantidade em graus do motor por unidade de pixel,  $G(t)$  é medido para cada passo que o motor efetua, sendo calculado para cada eixo, pode ser positivo ou negativo, sendo descrito matematicamente por:

$$G(t)_i = \frac{\Delta grau_i}{\Delta pixel_i}$$

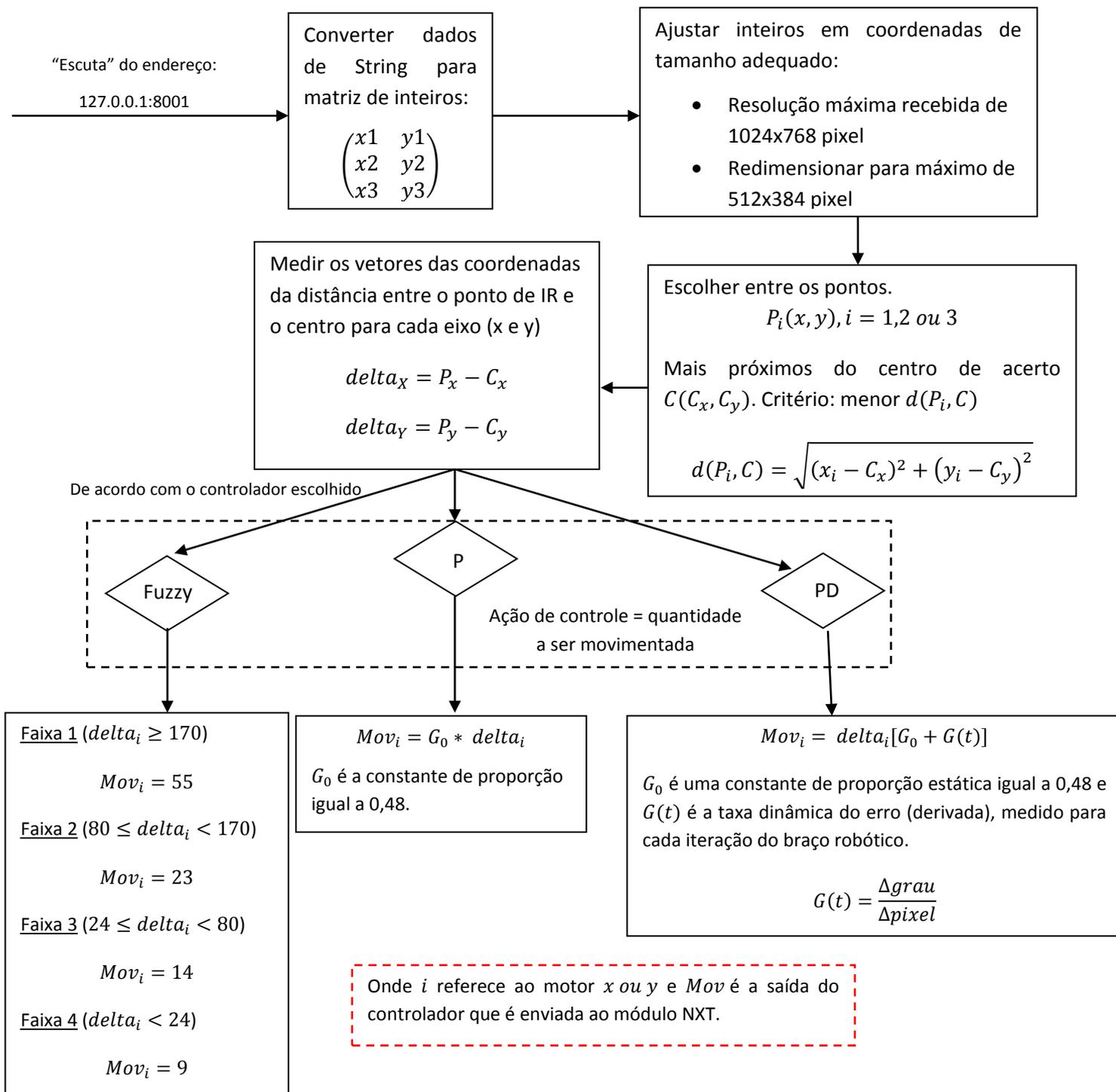
Ou seja,  $G(t)$  mede a derivada do erro que, somado a  $G_0$ , faz uma auto-correção do mesmo. O método proposto pelo controlador PD mostrou-se bastante eficiente, pois, apesar de encontrar a solução em um tempo razoável, a saída final está sempre na região de acerto e esse método foi o que melhor se ajustou às condições de velocidade.

A figura 16 representa o diagrama de bloco do controlador PD modificado para este projeto. Onde  $\delta_i$  é a mesma grandeza definida anteriormente,  $P_x$  e  $P_y$  é a realimentação negativa da posição final do ponto IR após a movimentação do braço,  $G(t)$  é o fator graus de rotação por unidade de pixel obtida dinamicamente como uma derivada e  $G_0$  é o fator constante proporcional. A saída final é a soma dos dois sistemas em paralelo.



**Figura 16 – Diagrama de bloco do sistema controlador PD paralelo**

Um diagrama foi elaborado para resumir a lógica do módulo controlador, destacando cada tipo de controlador dinâmico implementado. O diagrama é exibido na figura 17.

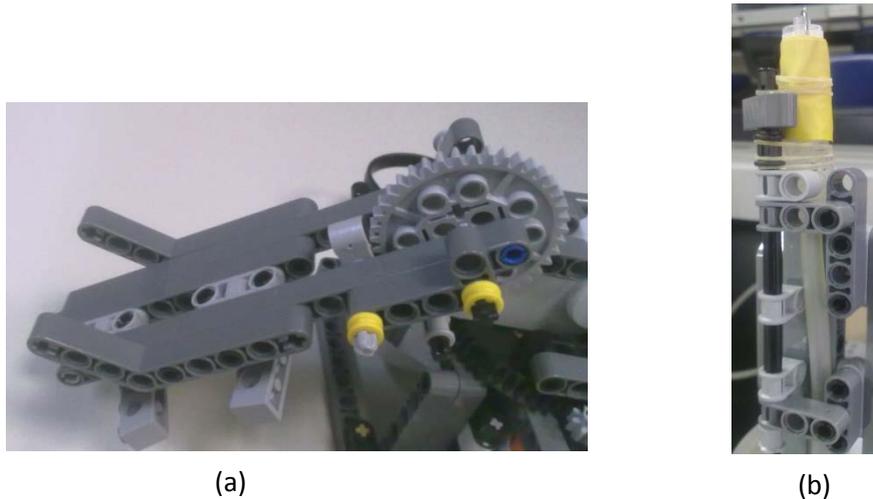


**Figura 17 – Diagrama funcional da lógica implementada no módulo Controlador incluindo os tipos de controladores.**

## 5.2. Protótipo Robótico

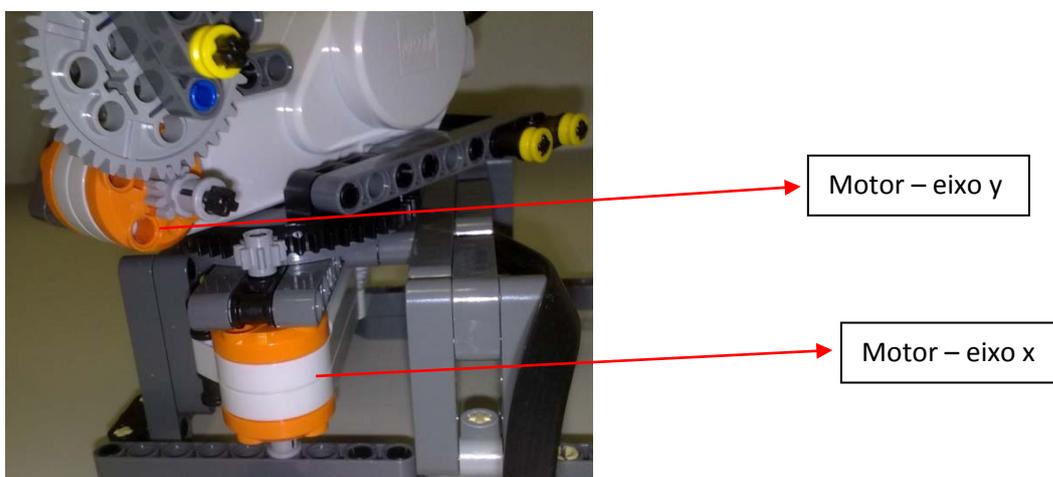
### 5.2.1. *Estrutura do Protótipo*

O protótipo foi construído seguindo como modelo o braço robótico da figura 5. A grande mudança foi a construção de uma cavidade como suporte para o wiimote e um suporte embaixo do wiimote, onde é possível fixar uma pequena mangueira flexível. A figura 18 exibe o suporte para o wiimote.



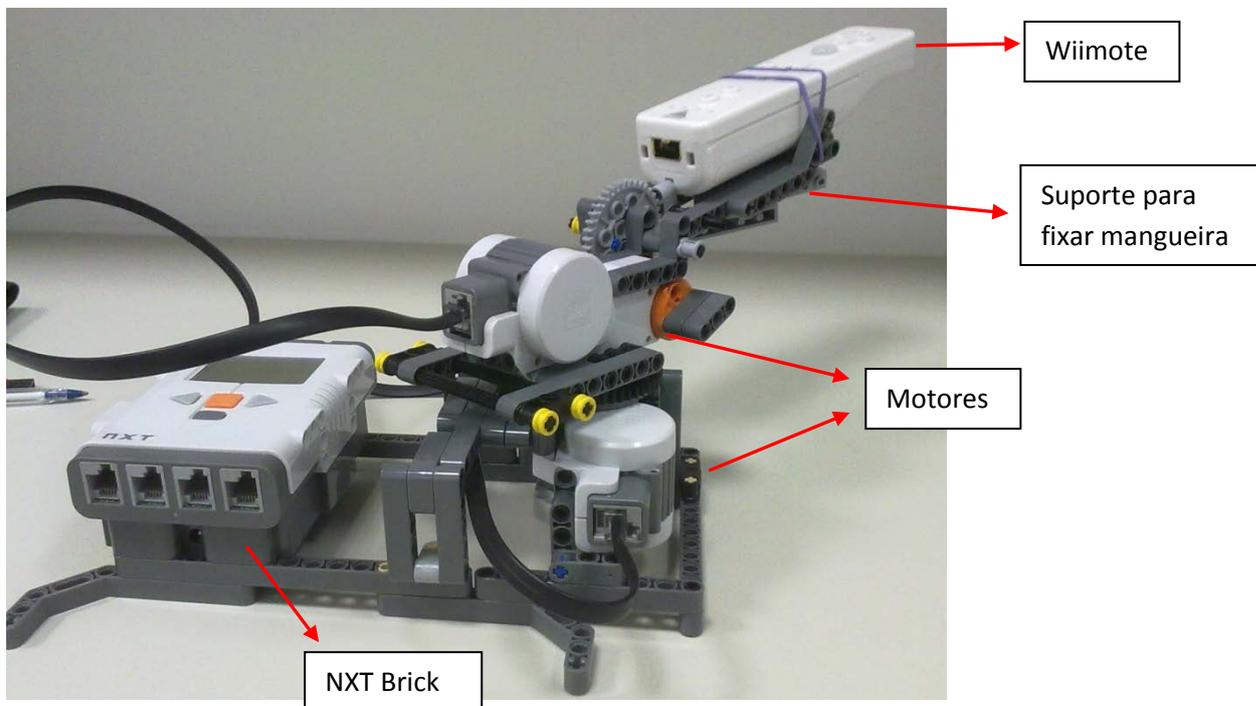
**Figura 18 – (a) suporte do controle wii (b) suporte para fixar mangueira extintora**

O protótipo tem 2 graus de liberdade, como já descrito anteriormente, um grau de liberdade verticalmente e outro grau de liberdade horizontalmente que permite deslocamento circular. A figura 19 ilustra os motores de cada eixo e as engrenagens de transmissão da primeira versão do protótipo.



**Figura 19 – Motores e eixos de transmissão versão 1**

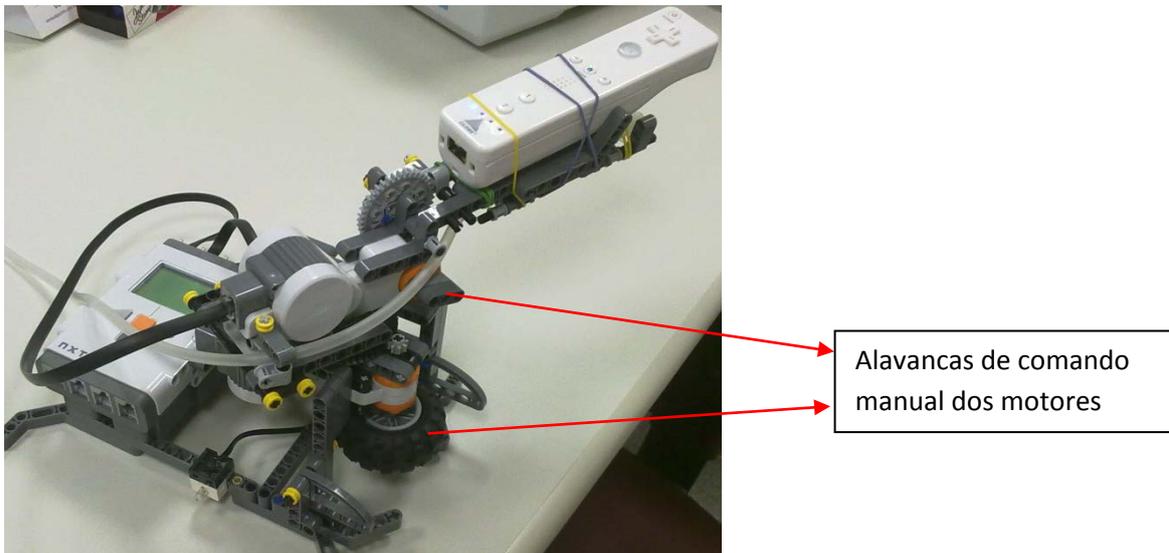
A figura 20 mostra o protótipo e suas partes de uma forma geral. O NXT brick tem 2 cabos conectados externamente, um é o cabo de transmissão de dados para um computador através da porta USB, outro cabo serve de alimentação elétrica do sistema. Em caso de falta de energia o NXT brick possui uma bateria interna recarregável que alimenta o sistema.



**Figura 20 – Visão geral da primeira versão do protótipo mecânico**

Como é possível observar na figura 20 o controle wii é colocado na cavidade do suporte no braço mecânico, para conferir maior fixação o wiimote é amarrado através de um elástico. Não é possível realizar uma revolução completa de  $360^\circ$  no eixo horizontal (eixo x) devido ao fio que liga o motor desse eixo, porém uma abertura satisfatória pode ser obtida com a calibração correta o braço robótico, permitindo alcançar qualquer ponto de infravermelho ao seu redor.

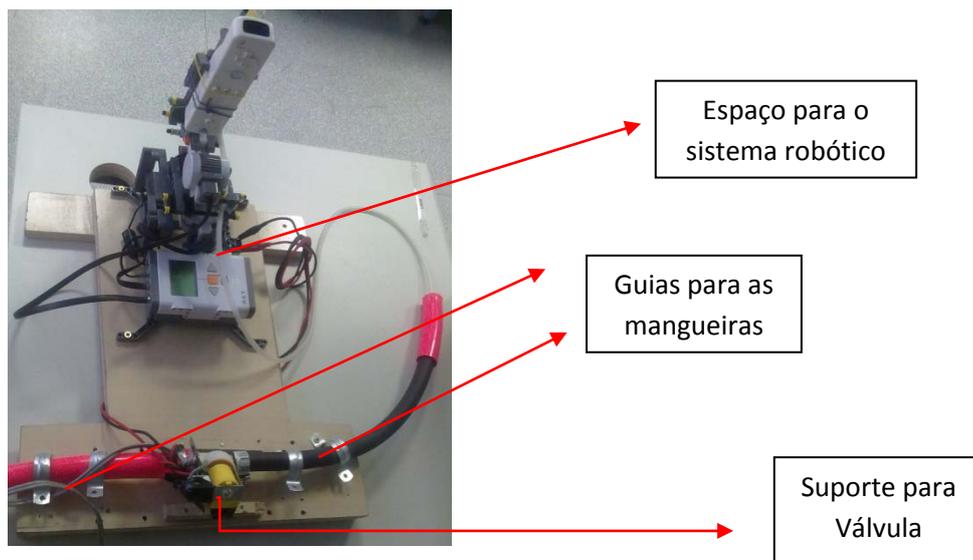
Uma segunda versão estrutural do protótipo foi feita, com pequenas modificações, a fim de melhorar a calibração do ponto de origem do sistema. Foram modificadas as configurações dos motores dos dois eixos (vertical e horizontal) e a fixação dos mesmos na base do NXT, de forma que é possível ajustar manualmente, e de modo rápido, qualquer posição para o braço mecânico através das alavancas presentes. A figura 21 ilustra a segunda versão do protótipo mecânico destacando as alavancas de movimentação manual.



**Figura 21 – Visão geral da segunda versão do protótipo**

A calibração do ponto de origem é um evento importante na programação do sistema, visto que toda a movimentação dos 2 motores exigem um referencial, isto é, no ponto inicial do sistema os tacômetros dos motores estão zerados e o sistema identifica este ponto como a origem das coordenadas ( $s_0$ ). A segunda versão facilitou o rápido ajuste na posição inicial que foi definida no centro do eixo horizontal e no extremo superior do eixo vertical. Uma rotina de curso de desligamento foi implementada para levar automaticamente o braço mecânico à posição inicial  $s_0$  sempre que o sistema for desligado, mesmo assim, as alavancas de comando manual dos motores facilitam o ajuste dos mesmos, caso o sistema trave ou “descalibre”.

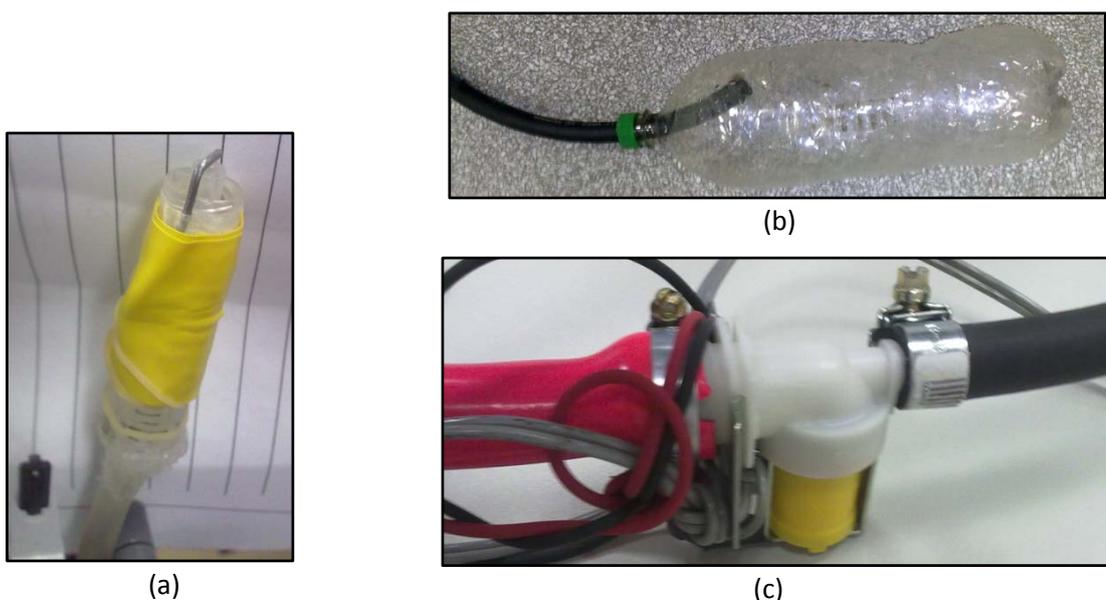
O suporte geral em madeira é ilustrado na figura 22. Neste suporte há um espaço para fixar o braço robótico, guias e escoras para as mangueiras que alimentam o sistema extintor.



**Figura 22 – Suporte geral em madeira**

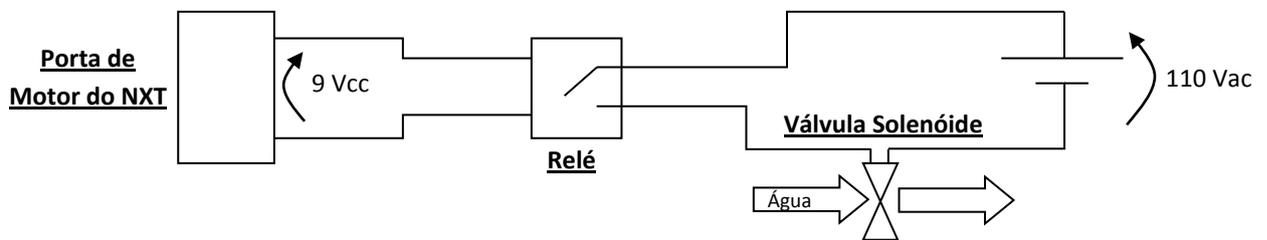
### 5.2.2. *Sistema Extintor*

As principais partes do sistema extintor são: Reservatório de água, válvula de controle e o Bico ejetor. O reservatório de água é uma garrafa PET de 3 litros, também é o local onde recebe carga para impulsionar o jato de água do bico. A válvula de controle é uma válvula solenóide de máquina de lavar que permite passagem de água quando acionada sobre uma tensão de 110 V (AC) o bico ejetor é um bico de seringa hospitalar adaptado no braço robótico. O conjunto de ilustrações da figura 23 idealiza as três partes do sistema extintor.

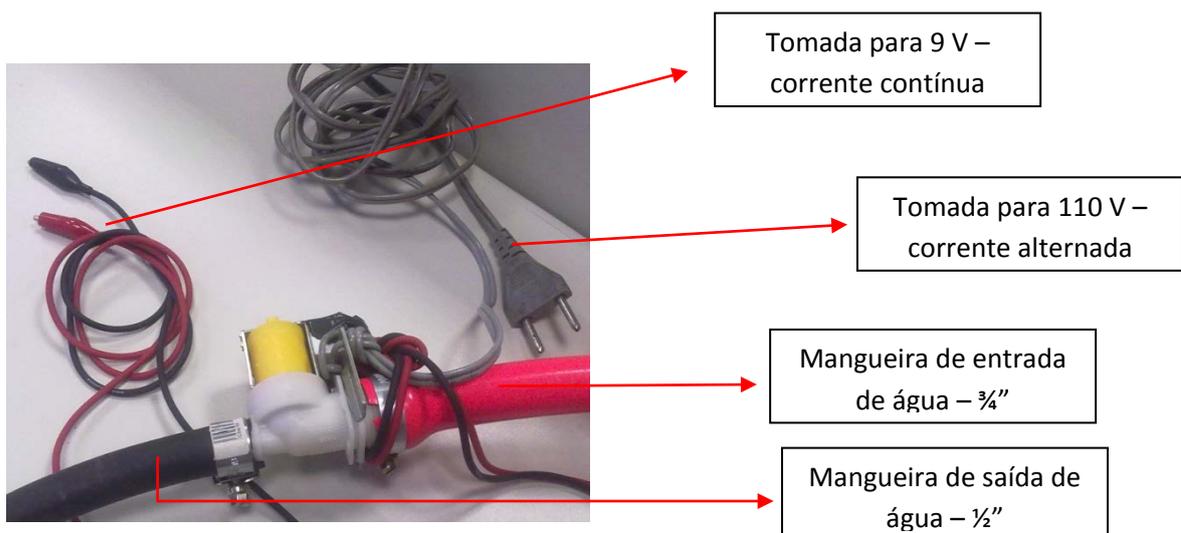


**Figura 23 – (a) bico ejetor de água; (b) reservatório de água; (c) Válvula solenóide**

Como a válvula solenóide exige uma tensão alternada de 110 V, foi utilizado para seu acionamento um relé com tensão de chaveamento em 9 V (CC – corrente contínua), relé é um dispositivo eletromecânico que controla uma chave através de uma tensão de entrada. A tensão de 9 V é ideal para o controle do acionamento da válvula por Relé, pois é a mesma tensão na saída da porta de motor do NXT Brick, assim, o módulo NXT precisa somente acionar o “motor” da porta C para acionar a válvula solenóide. A figura 24 exhibe um diagrama do circuito elétrico de acionamento. Na ilustração da figura 24 percebe-se que ao alimentar o relé com uma tensão de 9Vcc o mesmo fecha a chave do circuito secundário, o que permite passagem de corrente pela bobina da válvula solenóide sobre uma tensão de 110 Vac, abrindo a válvula que é normalmente fechada (NF) admitindo passagem de água.



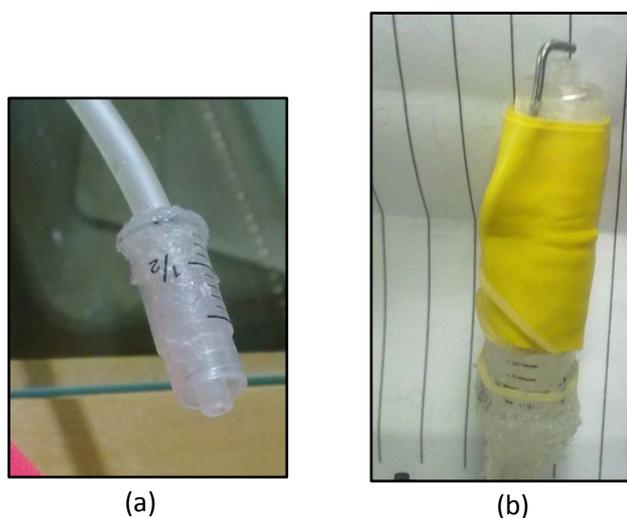
**Figura 24 – Diagrama do circuito elétrico de acionamento**



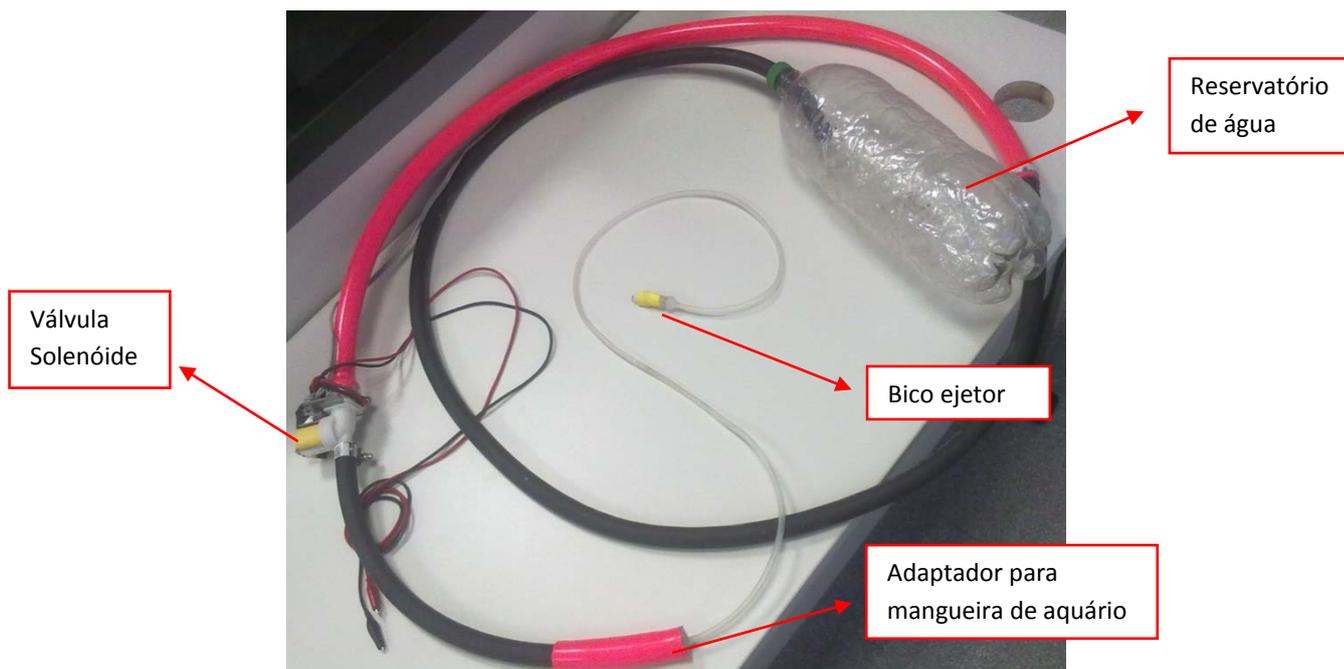
**Figura 25 – Válvula solenóide e suas partes**

A válvula solenóide admite um único fluxo de água, do diâmetro maior para o menor, caso contrário sua eficiência pode ser prejudicada. Na figura 25 a mangueira de cor rosa tem diâmetro de  $\frac{3}{4}$ " e a mangueira de cor preta tem  $\frac{1}{2}$ " de diâmetro. A conexão das mangueiras preta e rosa na válvula são feitas através de abraçadeiras metálicas. O diâmetro de entrada da válvula é de  $\frac{3}{4}$ ", logo a mangueira rosa conecta a entrada da válvula com o reservatório (garrafa PET), a saída da válvula, que tem diâmetro de  $\frac{1}{2}$ ", é conectada com a mangueira preta que leva a água da saída até um adaptador onde ocorre a redução do diâmetro para  $\frac{1}{16}$ ", mesmo diâmetro da mangueira de aquário. A mangueira de aquário é fixada junto ao braço mecânico através de guias no suporte da mangueira [vide figura 18 (b)]. Uma adaptação foi feita para acoplar a mangueira de aquário com a seringa hospitalar (bico ejetor).

O bico ejetor é fundamental para a eficiência do sistema no método de combate a incêndio, uma primeira versão do sistema extintor utilizava somente o bico de seringa, entretanto dessa forma o jato de água expelido era muito grosso (canalizado) e pouco fino, o que exige maior precisão do sistema de controle de posicionamento do braço mecânico. Uma segunda versão do bico ejetor incluiu uma ponteira no bico da seringa formando um obstáculo ao jato de água, o que o torna mais fino e abrangente. A figura 26 ilustra o bico ejetor em detalhe. A figura 27 exhibe uma visão geral do sistema extintor.



**Figura 26 – Bico ejetor: (a) versão 1; (b) versão 2**



**Figura 27 – Visão geral do sistema extintor**

### **5.3. Testes e parâmetros do sistema**

#### **5.3.1. Resultados do teste de alcance de detecção**

Através dos procedimentos descritos na seção 6.4.1 (Teste de Alcance) foi possível mensurar o campo de visão da câmera IR do wiimote, permitindo conhecer o raio de alcance máximo. O teste de alcance foi dividido em dois testes: o primeiro permite medir a distância máxima em profundidade que o wiimote detecta, o segundo teste detecta o raio de visão do sistema. A tabela 3 indica os dados do primeiro teste.

**Tabela 3 – Resultados para teste de detecção em profundidade**

| <b>Ensaio</b> | <b>Distância [m]</b> |
|---------------|----------------------|
| 1             | 1,13                 |
| 2             | 1,21                 |
| 3             | 1,2                  |
| 4             | 1,09                 |
| 5             | 1,06                 |
| 6             | 1,08                 |
| Média         | 1,13                 |

Segundo os resultados a distância média que o wiimote consegue detectar um foco de luz IR é 1,13 m ou 113 cm, este teste é válido para uma fonte de luz do tipo vela incandescente, após o terceiro ensaio percebe-se uma significativa diminuição da distância de detecção, isso indica que a variação da intensidade de luminosidade devido à própria queima da vela influencia diretamente nos resultados

Para a segunda etapa deste teste foram colhidos os dados para teste de visão horizontal máxima e teste para visão vertical máxima. Os dados são exibidos nas tabelas 4 e 5.

**Tabela 4 – Resultados para teste de visão horizontal máxima**

| Ensaio | r [cm] | D [cm] |
|--------|--------|--------|
| 1      | 29     | 58     |
| 2      | 32     | 59     |
| 3      | 21     | 43     |
| 4      | 23     | 46     |
| 5      | 31     | 64     |
| Média  | 27,2   | 54     |

Os parâmetros  $r$  e  $D$  da tabela 4 estão de acordo com a figura 7 (seção de metodologia) É possível observar que, para uma distância em profundidade média de 54 cm a visão horizontal média obtida é de 27,2 cm.

**Tabela 5 – Resultados para o teste de visão vertical máxima**

| Ensaio | H [cm] | d [cm] | D [cm] | h [cm]       |
|--------|--------|--------|--------|--------------|
| 1      | 33     | 42     | 73     | <b>18,99</b> |
| 2      | 35,8   | 41,7   | 72,5   | <b>20,59</b> |
| 3      | 35,5   | 43     | 72,5   | <b>21,06</b> |
| 4      | 39,3   | 42,5   | 72     | <b>23,20</b> |
| 5      | 35     | 43     | 72,2   | <b>20,84</b> |
| 6      | 36     | 42,6   | 72,3   | <b>21,21</b> |
| 7      | 35,4   | 43,3   | 72,5   | <b>21,14</b> |
| Média  | 35,71  | 42,59  | 72,43  | <b>21,00</b> |

Os parâmetros da tabela 5 são os mesmos da figura 8 da seção de metodologia. O parâmetro  $h$  é calculado com base na semelhança de triângulos da figura 8. Seu valor médio de 21 cm foi obtido através do cálculo de  $h$  com os valores médios. Isto é, como:

$$\frac{D}{d} = \frac{H}{h} \rightarrow h = \frac{Hd}{D} = \frac{(35,71 * 42,59)}{72,43} \cong 21 \text{ cm}$$

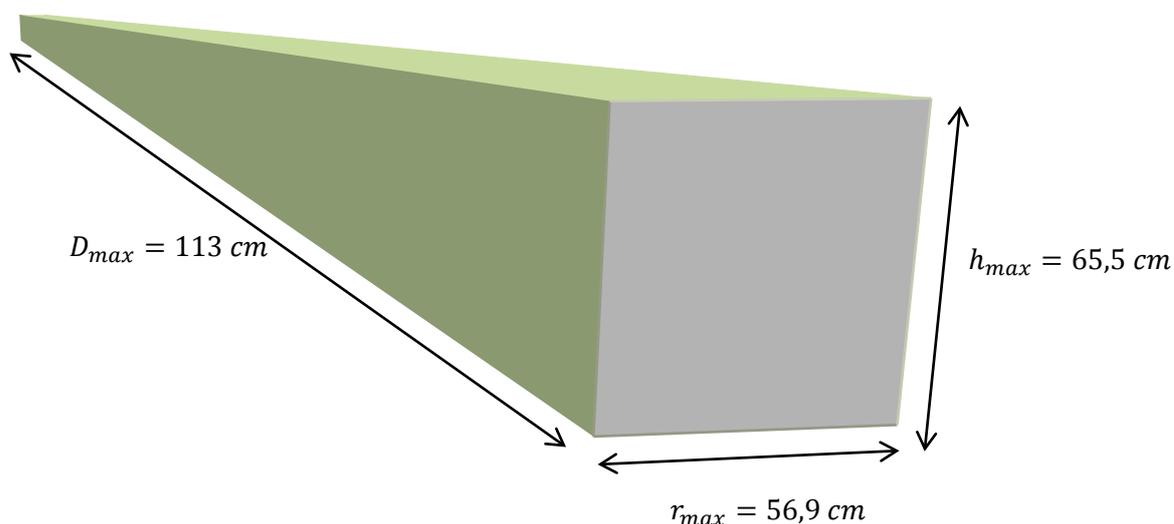
Logo, para uma distância em profundidade (D) média de 72,43 cm tem-se um raio médio vertical de 21 cm. A distância vertical máxima é igual a 2h logo e 42 cm.

Extrapolando os resultados dos raios de visão horizontal e vertical para o valor máximo de detecção em profundidade obtido (113 cm) é possível reconstruir o campo de visão do sistema. Para tanto, foi calculado, através de uma simples regra de 3, as distâncias horizontais e verticais máximas à 113 cm. O resultado é exibido na tabela 6.

**Tabela 6 – Alcance vertical e horizontal máximo à 113 cm de distância**

|            |          |
|------------|----------|
| $D_{max}$  | 113 cm   |
| $2h_{max}$ | 65,53 cm |
| $r_{max}$  | 56,92 cm |

O campo de visão do sistema foi reconstruído numa perspectiva com o auxílio dos valores da tabela 6. O resultado é exibido na figura 28.



**Figura 28 – Perspectiva do campo de visão da câmera de IR digital do wii mote**

O perfil lateral da perspectiva é obtido na figura 29. Onde foi calculado o ângulo de visão  $\varphi$  do wiimote. Sendo:

$$\varphi = 2\theta$$

$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{h}{D}\right)$$

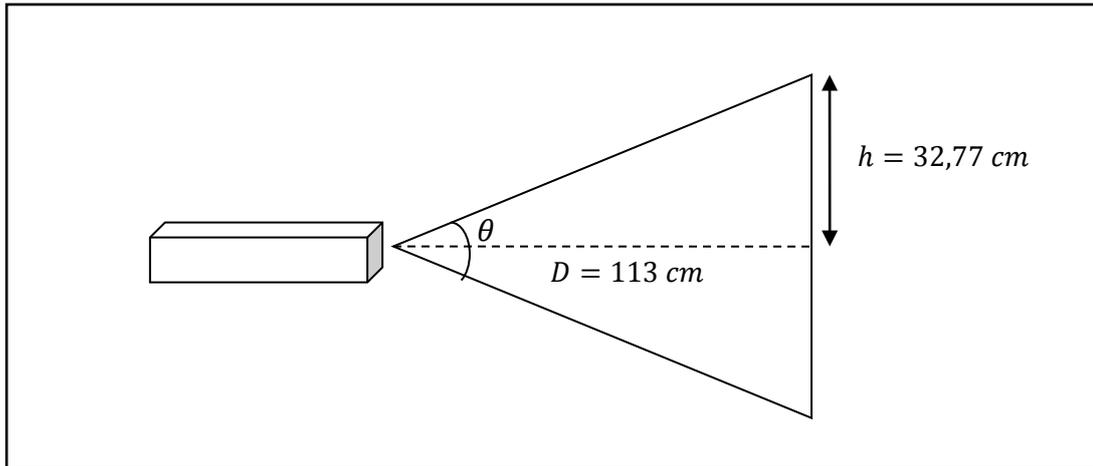


Figura 29 – Perfil lateral da perspectiva.

Então o valor de  $\theta$  obtido foi de  $16,17^\circ$ , assim  $\varphi = 32,34^\circ$ . Uma mesma análise pode ser feita para o plano horizontal, isto é, substituindo-se  $h$  por  $\frac{r_{max}}{2}$ , assim o valor de  $\theta$  obtido foi de  $14,13^\circ$  e  $\varphi = 28,26^\circ$ . O ângulo de visão vertical e horizontal são próximos, isso ocorre devido ao plano de alcance com dimensões quase quadradas. O resultado mostra-se dentro do esperado considerando os erros no método de medição, pois o ângulo de visão mencionado por LEE (2008) é de aproximadamente  $45^\circ$ .

### 5.3.2. Resultados do teste de velocidade de controle

Os procedimentos foram descritos na seção 6.4.2. Os resultados obtidos foram resumidos na tabela 7.

Tabela 7 – Resultados do teste de velocidade de controle

| Controle/tempo | t1 [s] | t2 [s] | t3 [s] | t4 [s] | t5 [s] | t6 [s] | tMédio [s] |
|----------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|------------|
| Fuzzy          | 19,59  | 20,66  | 22,64  | 19,69  | 19,94  | 19,06  | 19,79      |
| P              | 15,22  | 16,93  | 15,22  | 17,31  | 14,88  | 16,72  | 15,79      |
| PD             | 16,75  | 18,03  | 19,12  | 18,97  | 18,87  | 15,81  | 17,69      |

Observando-se os resultados da tabela 7 percebe-se que o controle que estabelece seu valor de regime no intervalo de tempo mais curto é o tipo P (proporcional) e o controle que atinge a estabilidade e centraliza em maior tempo, ou seja, o mais lento é o controlador Fuzzy.

O método adotado para o teste apresentou-se muito susceptível a erros de medições, pois era necessário ajustar manualmente a posição inicial do braço robótico, além disso, a parada do cronômetro foi feita manualmente também. Dessa forma tomou-se uma média normalizada onde os valores de maior tempo de cada conjunto de testes foram descartados.

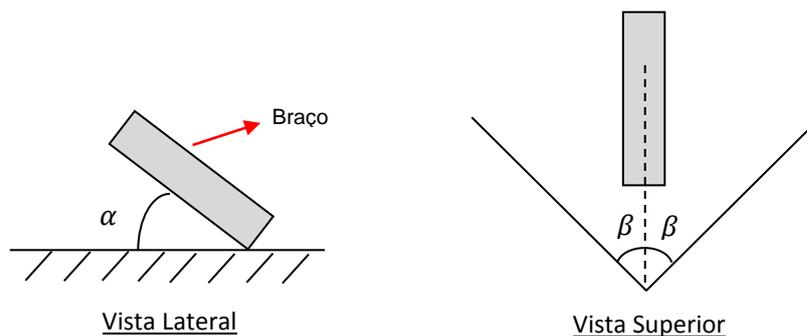
O controlador mais rápido é o controlador do tipo proporcional (P) apresentando um tempo de resposta de 15,8 s, enquanto que o controlador PD (proporcional-derivativo), com um tempo de resposta de 17,7 s, apresentou-se o mais estável, visto que somente estacionava o braço robótico quando está realmente localizado dentro da região de acerto. O controle do tipo *Fuzzy*, apesar de ser uma solução fácil de ser implementada, mostrou-se o tipo de controle mais lento, este tipo de controlador provavelmente necessita de alguns testes e calibrações adicionais para melhorar os parâmetros de “defuzzificação” adotados.

### 5.3.3. Resultados dos testes com o sistema extintor

Alguns testes foram feitos com o sistema extintor sem ajuste prévio e com ajuste. Os ajustes no sistema extintor se concentraram em modificação na estrutura e modificação na programação da rotina de combate. As variáveis da rotina de combate modificadas foram:

- Ângulo de ataque
- Ângulo de curso lateral
- Velocidade de inclinação do braço

A figura 30 exhibe a representação de cada variável da programação do módulo NXT no sistema físico. O ângulo  $\alpha$  representa o ângulo de ataque e o ângulo  $\beta$  é o ângulo de curso lateral.



**Figura 30 – Representação das variáveis de programação**

Recapitulando a rotina do método de combate do módulo NXT (explicado na sessão 7.1.3), o braço inicialmente inclina até atingir o ângulo de ataque, depois inicia uma seqüência de zigue-zague alternando o curso lateral pela quantidade do ângulo de curso lateral ( $\beta$ ). Durante a movimentação lateral o braço desce lentamente até atingir um ângulo de ataque  $\alpha = 0$ , ou seja, o braço está paralelo com o plano horizontal. A rotina é repetida durante 4 segundos, caso o incêndio não tenha sido controlado, o sistema retoma a rotina de combate centralizando o foco de incêndio no centro de acerto. Se não, caso o incêndio tenha sido controlado com sucesso, o sistema resume e retorna à rotina de busca procurando pontos (focos) de luz IR.

Após uma série de testes definiu-se as quantidades ideais para as variáveis de programação, sendo elas:  $\alpha = 20^\circ$ ,  $\beta = 6^\circ$  e  $v_{in}$  (velocidade de inclinação) =  $25^\circ/s$ . Os testes mostraram que, de forma qualitativa, o sistema apresentava-se lento e com dificuldades para apagar um único foco de incêndio de primeira tentativa. Esse problema foi corrigido através de uma modificação estrutural do bico ejetor, como explanado na sessão protótipo robótico – Sistema extintor (7.2.2.), na segunda versão do bico ejetor foi acoplado uma ponteira de forma a obstruir parcialmente a passagem de água do bico ejetor, dessa forma, o jato de água forma um spray ao invés de um jato canalizado, o que otimiza o combate ao incêndio, uma vez que sprays são mais aspersionados absorvendo melhor o calor.

Os resultados do teste comparativo do alcance do sistema extintor são exibidos na tabela 8.

**Tabela 8 – Resultados do testes de alcance do sistema extintor**

|                      |                    | <b>Distância da vela [cm]</b> |           |            |
|----------------------|--------------------|-------------------------------|-----------|------------|
|                      |                    | <b>60</b>                     | <b>90</b> | <b>120</b> |
| <b>Tempos</b><br>[s] | <b>Bico Ejetor</b> |                               |           |            |
|                      | S/ ajuste          | 3,5                           | 6,7       | 8,4        |
|                      | Ajustado           | 4,5                           | 5         | 5,8        |

Os resultados mostram que para o sistema sem ajuste, quanto mais longe o foco de incêndio maior é a dificuldade para apagá-lo, pois maiores foram os tempos. Com o sistema extintor ajustado, é interessante notar que a variação dos dados com relação à média é baixa, mostrando que o sistema ajustado responde de forma concisa numa faixa maior de alcance, em comparação ao sistema sem ajustes.

O segundo teste somente foi realizado para o sistema ajustado, ou seja, com a melhor configuração das variáveis de programação e com o bico ejetor modificado. O intuito é descobrir a melhor distância de combate, avaliando o local onde o spray de água é mais eficiente. Os resultados são exibidos na tabela 9.

**Tabela 9 – Resultados para o teste de avaliação do spray de água com bico ejetor ajustado.**

|                             | <b>Ensaio</b> | <b>Tempo</b> |
|-----------------------------|---------------|--------------|
| <b>Dupla fonte - a 50cm</b> | 1             | 23,8         |
|                             | 2             | 18,5         |
|                             | 3             | 21,3         |
|                             | <b>Média</b>  | <b>21,2</b>  |
| <b>Dupla fonte - a 90cm</b> | 1             | 11,8         |
|                             | 2             | 6,5          |
|                             | 3             | 6,3          |
|                             | <b>Média</b>  | <b>11,8</b>  |

Os resultados mostram que a média dos tempos para distância de 90 cm é menor com relação à média para distância de 50 cm, mostrando que para distâncias de 90 cm o sistema é mais eficiente. Observando o spray a 90 cm percebe-se uma abertura num raio de aproximado de 7 cm. Vale ressaltar que em distâncias curtas a fonte dupla é detectada e apagada uma por vez, ou seja, o sistema focaliza uma fonte e apaga somente esta fonte, já na distância de 90 cm o sistema localiza uma fonte, entretanto devido à abertura do spray e ao curso lateral da rotina de combate, acaba apagando as duas fontes simultaneamente o que representa economia de tempo para o teste. Para distâncias maiores que 110 cm a abertura do jato torna-se ineficiente.

Avaliando qualitativamente o bico ejetor com a ponteira e sem a ponteira é possível destacar que o sistema com ponteira teve seu alcance reduzido, toda via, para distâncias maiores que 30 cm o jato mostra-se mais fino absorvendo melhor o calor.

#### **5.4. Análise de viabilidade e comparação com o Sistema de chuveiro automático**

Um dos sistemas automáticos mais empregado no mercado de proteção contra incêndio é o sistema de chuveiro (sprinkler) pendente, visando mostrar a competitividade do sistema inteligente robótico de proteção a incêndio proposto neste projeto foi feita uma análise comparativa dos custos inerentes à instalação e equipamentos dos dois sistemas.

Em contato com a empresa REI FIRE (2011) um orçamento foi solicitado ao representante ANAEL SANTANA (contato@reifire.com.br) para proteção de um ambiente com área de  $110 m^2$ , o custo estimado para o projeto foi de R\$65.000,00 incluindo equipamentos e mão-de-obra. Destacam-se os seguintes equipamentos mais custosos empregados no projeto de chuveiro pendente:

- 35 Bicos de sprinkler
- 1 eletro bomba de 50 cv
- 1 eletro bomba Jockey 7,5 cv
- Conjunto de elementos de fixação de tubulação
- Conjunto de elementos de fixação dos sprinklers

Os custos de equipamentos não incluem gastos com reservatório de água. Segundo o representante a área de cobertura de um único sprinkler é em média uma circunferência de raio de  $3 m$ , ou seja, um único sprinkler cobre uma área de  $28m^2$ . Entretanto, por questões de segurança, o padrão de montagem dos chuveiros leva em conta uma sobreposição da área de cobertura por vários chuveiros, isto significa que um determinado ponto é coberto por mais de um chuveiro simultaneamente.

Para efeito de comparação será utilizada a razão  $\gamma$  descrita por:

$$\gamma = \frac{\text{Custo}}{\text{Área de cobertura}}$$

O projeto proposto do sistema de chuveiro automático apresentou um  $\gamma_1$  de

$$\frac{R\$65.000,00}{110m^2} \rightarrow \gamma_1 \cong R\$591,00/m^2$$

Foi proposta a análise dos custos do projeto do sistema robótico inteligente levando-se em consideração os seguintes equipamentos:

- Sistema extintor: R\$50,00
- Câmera CCD (controle wii mote): R\$80,00
- \*Kit Lego Mindstorm: R\$1300,00

\*Foi considerado apenas 70% do preço do Kit Lego Mindstorm, visto que somente foi utilizado 2 dos 3 motores DC e nenhum dos sensores que acompanham o kit como o sensor de cor, o sensor de distância e o sensor de som.

O custo total do protótipo do sistema inteligente de combate a incêndio foi estimado em R\$1.430,00 sem considerar a mão-de-obra.

Para estimar a área de cobertura do sistema robótico deve-se considerar qual o fator limitante para cobertura do sistema, é possível destacar dois principais fatores:

- Alcance da câmera CCD IR
- Alcance do sistema extintor

Nos testes com fonte de incêndio disposta no mesmo plano do sistema robótico, o alcance médio da câmera foi de 1,13 m e do sistema extintor de 0,9 m, logo o fator limitante do sistema robótico é o sistema extintor. Estimando a área de cobertura como a área de uma circunferência de raio igual a 0,9 m com arco de 252°, ou seja, 70% da área de uma circunferência de raio igual a 0,9 m, isso equivale a uma área de  $A_{rob} = 1,78 m^2$

O fator  $\gamma$  do protótipo robótico de combate a incêndio é dado por:

$$\gamma_2 = \frac{R\$1.430,00}{1,78m^2} \cong \frac{R\$803,00}{m^2}$$

Comparando-se  $\gamma_1$  com  $\gamma_2$  fica claro que o protótipo robótico é mais custoso que o sistema de chuveiro automático pendente, o protótipo robótico representa um acréscimo de 35,9% com relação ao custo do sistema de chuveiro automático para a mesma área de cobertura, entretanto vale ressaltar que o sistema robótico utiliza microprocessador no NXT, sistema computacional para controle e motores de corrente contínua, o que encarece o

sistema. Ainda assim, o sistema robótico supre uma deficiência do sistema automático que é o disparo não-localizado para focos de incêndio iniciais e pequenos.

O cuidado necessário no combate a incêndio, principalmente em ambientes frequentados por humanos, exige sistemas de proteção redundantes, ou seja, o emprego de mais de um sistema de proteção em paralelo aumentando a confiabilidade do sistema em geral. É por esse motivo que sistemas de chuveiro automático são empregados em conjunto com sistemas sob comando. Nesse contexto de sistemas redundantes, seria plausível a aplicação do sistema robótico inteligente de combate a incêndio como um possível substituto para o sistema de chuveiro automático, pois, mesmo observado seus custos maiores, o sistema inteligente conta com uma possível rápida integração com sistemas de alerta e aviso que geralmente empregam sistemas computacionais centralizados.

## 6. CONCLUSÃO

Durante a execução do projeto foram estudados conceitos de transmissão de dados: TCP/IP, Bluetooth e USB; foram analisados os métodos de combate a incêndio, classificação de incêndio e os tipos de dispositivos de combate atualmente existentes. Foi possível concluir todos os módulos de programação: programa de aquisição de dados do wiimote, programa de interação com o usuário (módulo controlador) e o programa de processamento do NXT (módulo NXT); assim como a conclusão da estrutura do protótipo funcional.

Três tipos de controladores foram implementados no sistema final com a finalidade de se obter um parâmetro comparativo entre eles. Percebeu-se que o controle que melhor se ajustou ao problema foi o controlador proporcional, o controlador mais estável é o controlador proporcional-derivativo (PD). O controlador mais fácil de ser implementado, controlador *Fuzzy*, não teve um desempenho satisfatório na análise do tempo de resposta, sendo o tipo de controlador mais lento para esta aplicação. É possível melhorar as respostas dos controladores através de modificações de alguns parâmetros do sistema.

Com o estudo dos parâmetros da câmera IR do wiimote foi reconstruído o campo de visão geral em perspectiva da câmera, observou-se que o mesmo possui uma detecção média de até 1,13 m e um plano de visão de aproximadamente 57 cm x 66 cm.

Foi construído um sistema extintor que emprega água como agente de combate, um sistema que utiliza o princípio de Pascal controla o incêndio por um bico ejetor feito de seringa hospitalar. O sistema extintor, à primeira vista, mostra-se um tanto rústico, entretanto satisfaz as necessidades do protótipo funcional construído.

O sistema extintor apresentou um alcance médio próximo de 1m, mas tem maior eficiência de combate a 90 cm, levando em média 5 segundos para controlar um incêndio em qualquer faixa de distância contida entre 60 cm até 120 cm. Modificações estruturais foram feitas no sistema extintor a fim de aprimorar o desempenho do mesmo, a principal foi a fixação de uma ponteira para formação de spray de água ao invés de um jato canalizado, o spray mostrou-se mais eficiente, pois absorve melhor o calor do fogo.

Uma análise de viabilidade foi feita utilizando um orçamento para proteção de um ambiente de 110 m<sup>2</sup> que emprega o sistema de chuveiro automático (sprinkler) pendente. Através de contato com empresa especialista do ramo de sistemas contra incêndio (REI FIRE), chegou-se numa razão custo por área protegida de R\$591,00/m<sup>2</sup>, contra uma estimativa de R\$803,00/m<sup>2</sup> para o sistema robótico inteligente de combate a incêndio baseado no desenvolvimento deste projeto, os custos do sistema robótico ainda não incluem a mão-de-obra e instalação hidráulica.

Mesmo evidente o maior custo do sistema robótico, o mesmo torna-se plausível como sistema redundante de combate a incêndio, pois o custo adicional do sistema inteligente não ultrapassa 50% do custo total do sistema de chuveiro pendente e o uso de sistema computacional permite rápida integração com centrais de disparo de alerta, podendo ser empregado juntamente com sistemas sob comando e, até mesmo, com o próprio sistema de chuveiro automático, representando uma maior confiabilidade nos sistemas de combate a incêndio e mais segurança para proteção do ambiente.

## 7. REFERÊNCIAS

- ALECRIM, Emerson.; **Tecnologia Bluetooth** - Info Wester. 2008. Disponível em:  
< <http://www.infowester.com/bluetooth.php>> Acessado em: 20/03/2011
- BRETANO, Telmo; **Instalações hidráulicas de combate a incêndios nas edificações**. Porto Alegre: EDIPUCRS, 3 ed. 2007.
- FERRARI, M.; FERRARI, G.; ASTOLFO, D.; **Building Robots with Lego Mindstorms NXT**. Massachusetts: Syngress, 2007. Disponível em:  
< <http://migre.me/45Bo3> > Acessado em: 23/02/2011.
- FERREIRA, P.; et al; Robôs made in Brasil. **Revista Inovação em Pauta**. n. 7, p. 56-61. 2007. Disponível em: <[http://www.finep.gov.br/imprensa/revista/edicao7/inovacao\\_em\\_pauta\\_7\\_robo.pdf](http://www.finep.gov.br/imprensa/revista/edicao7/inovacao_em_pauta_7_robo.pdf)> Acessado em: 10/02/2011.
- GONÇALVES, O. M.; OLIVEIRA, L. H.; **Sistemas Prediais de Combate a Incêndios – Chuveiros Automáticos – Sprinklers** Notas de aula in PCC 2465 – Sistemas Prediais I. Departamento de Engenharia de Construção Civil da EP USP (Universidade de São Paulo). 2007. Disponível em: <[http://pcc2465.pcc.usp.br/materiais\\_notas%20de%20aula.htm](http://pcc2465.pcc.usp.br/materiais_notas%20de%20aula.htm)> Acessado em: 02/03/2011.
- GOODRICH, M. T.; TAMASSIA, R.; **Estruturas de dados e algoritmos em JAVA**. 4ª Ed – Porto Alegre: Bookman. 2007 Disponível em: < <http://migre.me/45Bq4> > Acessado em: 19/03/2011
- JUNGES, L. C.D.; **Introdução à Lógica Fuzzy**. Departamento de sistemas industriais inteligentes – UFSC (Universidade Federal de Santa Catarina). 2006. Acessado em: 11/03/2011. Disponível em: <<http://s2i.das.ufsc.br/seminarios/apresentacoes/logica-fuzzy.pdf>> Acessado em: 18/03/2011
- LATHI, B. P.; **Sinais e Sistemas Lineares**. 2ª Ed. – Porto Alegre: Bookman, 2007. Cap. 1.7
- LEE, Johnny. C.; **Low-cost multi-point interactive whiteboards using the wiimote**, 2008 Disponível em: <<http://johnnylee.net/projects/wii/>> Acessado em: 17/02/2011.

LEE, Johnny. C.; Hacking Tradition: Hacking the Nintendo Wii remote. **Pervasive computing Magazine IEEE**. p. 39-45 Jul/Set 2008. Disponível em:

< <http://migre.me/49ZPk> > Acessado em: 01/03/2011

LeJOS Java for LEGO Mindstorm – **NXJ Technology**. Disponível em:

<<http://lejos.sourceforge.net/nxj.php>> Acessado em: 19/03/2011

MAESTRELLI, M.; et al. **Segurança na Web**. CBPF – Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas (Coordenação de atividades Técnicas). 2000

Mindstorms, 9841 **NXT Intelligent Brick** Disponível em: <<http://mindstorms.lego.com/en-us/history/default.aspx>> Acessado em: 22/02/2011.

nxtprogram.com, **Fun Projects for your LEGO MINDSTORM NXT**, 2008.

Disponível em: < <http://www.nxtprograms.com/index1.html> > Acessado em: 01/03/2011

OGATA, K.; **Engenharia de Controle Moderno**. 5ª Ed – São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2010. Cap 1 e 2.

**Sítio da PME-PR** (Polícia Militar do Estado do Paraná) – Comando do Corpo de Bombeiros.

Disponível em: <<http://www.policiamilitar.pr.gov.br/modules/conteudo/conteudo.php?conteudo=212>> Acessado em: 23/02/2011.

REI FIRE; **Sistemas contra incêndio**. Guarulhos. SP. Disponível em: <<http://reifire.com.br/>>

Acessado em: 25/07/2011