

**ESTUDIO E IMPLEMENTACIÓN PRELIMINAR DE UN PROTOTIPO PARA EL  
MONITOREO DE HUMEDAD EN EL PROCESO DE SECADO DE ARROZ**

**HERNANDO JAVIER ROCA FRANCO**

**CALIXTO SAENZ ROA**

**TECNOLÓGICA DE BOLIVAR INSTITUCIÓN UNIVERSITARIA  
FACULTAD DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA  
CARTAGENA DE INDIAS**

**2003**

**ESTUDIO E IMPLEMENTACIÓN PRELIMINAR DE UN PROTOTIPO PARA EL  
MONITOREO DE HUMEDAD EN EL PROCESO DE SECADO DE ARROZ**

**HERNANDO JAVIER ROCA FRANCO**

**CALIXTO SAENZ ROA**

Monografía presentada como requisito para optar el título de Ingeniero Electrónico

**Director**

**Jorge Eliécer Duque Pardo**

**Ingeniero Electricista**

**TECNOLÓGICA DE BOLIVAR INSTITUCIÓN UNIVERSITARIA  
FACULTAD DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA  
CARTAGENA DE INDIAS**

**2003**

Cartagena, 29 de Mayo de 2003.

Señores:

**COMITÉ DE EVALUACIÓN DE PROYECTOS DE GRADO.**

Facultad de Ingenierías Eléctrica y Electrónica.

Tecnológica de Bolívar Institución Universitaria.

La Ciudad

Distinguidos Señores:

Cordial saludo:

A través de la presente me permito entregar la monografía titulada **“ESTUDIO E IMPLEMENTACIÓN DE UN PROTOTIPO PARA EL MONITOREO DE HUMEDAD EN EL PROCESO DE SECADO DE ARROZ”** para su estudio y evaluación, como requisito fundamental para obtener el Título de Ingeniero Electrónico.

**En espera de que éste cumpla con las normas pertinentes establecidas por la Institución me despido.**

Atentamente.

---

**Hernando Javier Roca Franco.**

**Código:9804032**

Cartagena, 29 de Mayo de 2003.

Señores:

**COMITÉ DE EVALUACIÓN DE PROYECTOS DE GRADO.**

Facultad de Ingenierías Eléctrica y Electrónica.

Tecnológica de Bolívar Institución Universitaria.

La Ciudad

Distinguidos Señores:

Cordial saludo:

A través de la presente me permito entregar la monografía titulada **“ESTUDIO E IMPLEMENTACIÓN DE UN PROTOTIPO PARA EL MONITOREO DE HUMEDAD EN EL PROCESO DE SECADO DE ARROZ”** para su estudio y evaluación, como requisito fundamental para obtener el Título de Ingeniero Electrónico.

**En espera de que éste cumpla con las normas pertinentes establecidas por la Institución me despido.**

Atentamente.

---

**Calixto Saenz Roa.**

**Código: 9804037**

Cartagena, 28 de Mayo de 2003.

Señores:

**COMITÉ DE EVALUACIÓN DE PROYECTOS DE GRADO.**

Facultad de Ingenierías Eléctrica y Electrónica.

Tecnológica de Bolívar Institución Universitaria.

La Ciudad.

Distinguidos Señores:

Cordial saludo.

A través de la presente me permito entregar la monografía titulada **“ESTUDIO E IMPLEMENTACIÓN DE UN PROTOTIPO PARA EL MONITOREO DE HUMEDAD EN EL PROCESO DE SECADO DE ARROZ”**, para su estudio y evaluación, el cual será realizado por los estudiantes HERNANDO ROCA FRANCO Y CALIXTO SAENZ ROA , del cual acepto ser su director.

**En espera de que éste cumpla con las normas pertinentes establecidas por la institución me despido.**

Atentamente.

---

**Jorge Eliécer Duque Pardo**

**Especialista en Automatización Industrial.**

**Nota de aceptación**

---

---

---

---

**Presidente del Jurado**

---

**Jurado**

---

**Jurado**

Cartagena de Indias, 30 de Mayo de 2003

## CONTENIDO

	Pág.
<b>RESUMEN</b>	<b>22</b>
<b>INTRODUCCIÓN</b>	<b>24</b>
<b>1. GENERALIDADES DEL SECADO DE GRANOS EN COLOMBIA</b>	<b>27</b>
<b>1.1 FACTORES QUE INFLUYEN EN LA CONSERVACIÓN DE LOS GRANOS</b>	<b>28</b>
<b>1.2 HUMEDAD DE LOS GRANOS</b>	<b>29</b>
<b>1.3 HIGROSCOPICIDAD EN EL GRANO DE ARROZ</b>	<b>32</b>
<b>1.4 SECADO DEL GRANO DE ARROZ</b>	<b>34</b>
<b>1.4.1 Sistemas de secado</b>	<b>35</b>
<b>1.4.2 Equipos mecánicos y combustibles utilizados en el secado con aire caliente</b>	<b>42</b>
<b>1.4.2.1 Ventiladores</b>	<b>43</b>
<b>1.4.2.2 Fuentes de calor</b>	<b>47</b>

<b>1.4.2.2.1 Cascarilla de arroz</b>	<b>48</b>
<b>1.4.3 Etapas del secamiento del grano de arroz</b>	<b>50</b>
<b>1.4.4 Velocidad de secado</b>	<b>52</b>
<b>1.4.4.1 Efectos físicos del secado rápido</b>	<b>53</b>
<b>1.4.5 Aspectos técnicos sobre el secamiento de arroz</b>	<b>54</b>
<b>2. SENSORES DE HUMEDAD EN GRANOS</b>	<b>67</b>
<b>2.1 SENSORES</b>	<b>67</b>
<b>2.2 DEFINICION DE HUMEDAD</b>	<b>68</b>
<b>2.3 DETERMINADORES DEL CONTENIDO DE HUMEDAD EN GRANOS</b>	<b>70</b>
<b>2.4 MÉTODOS DE MEDICIÓN DE HUMEDAD</b>	<b>70</b>
<b>2.4.1 Método de medición indirecta de humedad</b>	<b>72</b>
<b>2.4.1.1 Medidores eléctricos</b>	<b>73</b>
<b>3. OTROS MEDIDORES DEL CONTENIDO DE HUMEDAD DEL GRANO</b>	<b>95</b>
<b>3.1 MEDIDORES INDIRECTOS</b>	<b>95</b>

<b>3.1.1 Medidores de humedad relativa (HR)</b>	<b>96</b>
<b>3.1.1.1 Sensores de humedad relativa resistivos</b>	<b>98</b>
<b>3.1.1.2 Sensores de humedad relativa capacitivos</b>	<b>102</b>
<b>3.1.2 Medidores de humedad de radiofrecuencia en granos</b>	<b>103</b>
<b>3.1.3 Medidores de humedad por microondas</b>	<b>107</b>
<b>3.2 MEDIDORES DIRECTOS DE HUMEDAD</b>	<b>108</b>
<b>3.2.1 Reacción química</b>	<b>109</b>
<b>3.2.2 Método de destilación</b>	<b>109</b>
<b>3.2.3 Hornos de vacío</b>	<b>109</b>
<b>3.2.4 Radiación por microonda e infrarrojo</b>	<b>110</b>
<b>3.3 PATENTES DE MEDIDORES DE HUMEDAD PARA GRANOS</b>	<b>110</b>
<b>3.3.1 Medidor de humedad para granos</b>	<b>111</b>
<b>3.3.2 Medidor eléctrico de humedad</b>	<b>114</b>
<b>3.3.2 Medidor de humedad del grano</b>	<b>118</b>
<b>4. DESCRIPCIÓN DEL PROTOTIPO CONSTRUIDO</b>	<b>121</b>

<b>4.1 DESCRIPCIÓN DEL PROTOTIPO</b>	<b>121</b>
<b>4.2 ESPECIFICACIONES DE LA PLANTA PILOTO</b>	<b>125</b>
<b>4.2.1 Motor</b>	<b>125</b>
<b>4.2.2 Ventilador</b>	<b>127</b>
<b>4.2.3 Resistencias Eléctricas</b>	<b>130</b>
<b>4.2.4 Alberca</b>	<b>131</b>
<b>4.3 ESPECIFICACIONES DEL PROTOTIPO DEL SENSOR</b>	<b>134</b>
<b>4.3.1 Método de medición de humedad utilizado por el sensor</b>	<b>134</b>
<b>4.3.1.1 Elemento primario</b>	<b>135</b>
<b>4.3.1.3 Diseño de la etapa de medición del prototipo</b>	<b>160</b>
<b>4.3.1.4 Estructura física del medidor de humedad</b>	<b>165</b>
<b>5. ANÁLISIS DE RESULTADOS</b>	<b>168</b>
<b>5.1 PRUEBAS DEL SISTEMA DE SECADO</b>	<b>168</b>
<b>5.1.1 Prueba N° 1</b>	<b>169</b>

<b>5.1.1.1 Equipos utilizados</b>	<b>172</b>
<b>5.1.2 Prueba N° 2</b>	<b>172</b>
<b>5.1.2.1 Equipos utilizados</b>	<b>176</b>
<b>5.2 Pruebas del sensor de humedad</b>	<b>177</b>
<b>5.2.1 Pruebas realizadas en campo para la calibración del medidor</b>	<b>177</b>
<b>5.2.1.1 Pruebas realizadas con electrodos de acero</b>	<b>177</b>
<b>5.2.1.2 Pruebas realizadas con electrodos de bronce</b>	<b>183</b>
<b>5.2.2 Pruebas realizadas en el laboratorio para la calibración del medidor</b>	<b>188</b>
<b>5.2.2.1 Pruebas realizadas con electrodos de acero</b>	<b>188</b>
<b>5.2.2.2 Pruebas realizadas con electrodos de bronce</b>	<b>192</b>
<b>6. CONCLUSIONES</b>	<b>204</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>208</b>
<b>ANEXOS</b>	<b>211</b>

## LISTA DE CUADROS

	Pág.
<b>Cuadro 1.1. Presión de vapor para varias temperaturas</b>	<b>57</b>
<b>Cuadro 4.1. Cuadro comparativo entre bronce y acero</b>	<b>139</b>
<b>Cuadro 4.2. Modo de operación para el selector de cuatro Posiciones</b>	<b>166</b>
<b>Cuadro 5.1. Medida de los factores al inicio del proceso de secado en la prueba N° 1</b>	<b>169</b>
<b>Cuadro 5.2. Variación de la temperatura del grano de arroz en la prueba N° 1</b>	<b>170</b>
<b>Cuadro 5.3. Medida de los factores al final del proceso de secado en prueba N° 1</b>	<b>171</b>
<b>Cuadro 5.4. Temperaturas iniciales del proceso de secado</b>	<b>173</b>
<b>Cuadro 5.5. Temperatura del grano en el proceso de secado para la prueba N° 2</b>	<b>174</b>
<b>Cuadro 5.6. Calibración en línea del medidor utilizando electrodos de acero</b>	<b>178</b>

<b>Cuadro 5.7. Calibración en línea del medidor utilizando electrodos de bronce</b>	<b>183</b>
<b>Cuadro 5.8. Calibración en el laboratorio del medidor utilizando electrodos de acero</b>	<b>189</b>
<b>Cuadro 5.9. Calibración en el laboratorio del medidor utilizando electrodos de bronce</b>	<b>192</b>
<b>Cuadro 5.10. Tabla de conversión de corriente a porcentaje de humedad</b>	<b>198</b>
<b>Cuadro 5.11. Tabla de ecuaciones en el modo de medición 1</b>	<b>201</b>
<b>Cuadro 5.12. Tabla de ecuaciones en el modo de medición 2</b>	<b>202</b>

## LISTA DE FIGURAS

	Pág.
<b>Figura 1.1. Relación entre la humedad relativa y el contenido de humedad</b>	<b>33</b>
<b>Figura 1.2. Secado con aire Frío</b>	<b>37</b>
<b>Figura 1.3. Comportamiento de la Temperatura</b>	<b>39</b>
<b>Figura 1.4. Comportamiento de la Humedad</b>	<b>40</b>
<b>Figura 1.5. Elementos básicos de un sistema de secado</b>	<b>42</b>
<b>Figura 1.6. Sistema de secado por aire caliente en albercas</b>	<b>43</b>
<b>Figura 1.7. Albercas inclinadas para el secado de arroz</b>	<b>43</b>
<b>Figura 1.8. Planta del proceso de secado de arroz en albercas</b>	<b>44</b>
<b>Figura 1.9. Ventilador tubo-axial</b>	<b>45</b>
<b>Figura 1.10. Ventilador vano-axial</b>	<b>45</b>
<b>Figura 1.11. Ventilador centrifugo</b>	<b>46</b>
<b>Figura 1.12. Curvas típicas de ventiladores</b>	<b>47</b>

<b>Figura 1.13. Quemador Super Brix</b>	<b>49</b>
<b>Figura 1.14. Colector de calor solar de piedras</b>	<b>50</b>
<b>Figura 1.15. Curva de secado de materiales higroscópicos</b>	<b>52</b>
<b>Figura 1.16. El proceso de secado en una carta psicrométrica</b>	<b>61</b>
<b>Figura 1.17. Calentamiento de aire y absorción de humedad durante el secado</b>	<b>62</b>
<b>Figura 2.1. Clasificación de los métodos de medición de humedad para granos</b>	<b>72</b>
<b>Figura 2.2. Electrodo de Copa</b>	<b>79</b>
<b>Figura 2.3. Electrodo de Puntas</b>	<b>80</b>
<b>Figura 2.4. Electrodo tipo Cuchillo</b>	<b>81</b>
<b>Figura 2.5. Empleo de electrodos resistivos en capas de granos de arroz</b>	<b>82</b>
<b>Figura 2.6. Medidor Resistivo</b>	<b>83</b>
<b>Figura 2.7. Sección vertical del prototipo 1 de electrodos</b>	<b>87</b>
<b>Figura 2.8. Vista superior del prototipo 1 de electrodos</b>	<b>88</b>
<b>Figura 2.9. Sección vertical del prototipo 2 de electrodos</b>	<b>90</b>

<b>Figura 2.10. Vista superior del prototipo 2 de electrodos</b>	<b>91</b>
<b>Figura 2.11. Motomco 919</b>	<b>93</b>
<b>Figura 3.1. Sensores resistivos de humedad relativa</b>	<b>98</b>
<b>Figura 3.2. Relación HR contra resistencia</b>	<b>99</b>
<b>Figura 3.3. Capas del sensor resistivo de HR</b>	<b>100</b>
<b>Figura 3.4. Sensor Resistivo de HR</b>	<b>101</b>
<b>Figura 3.5. Capacitancia contra HR (%)</b>	<b>102</b>
<b>Figura 3.6. Frecuencia Vs constante dieléctrica</b>	<b>104</b>
<b>Figura 3.7. Contenido de humedad Vs constante dieléctrica</b>	<b>104</b>
<b>Figura 3.8. Medidor de humedad para granos</b>	<b>113</b>
<b>Figura 3.9. Diagrama general para un medidor de humedad eléctrico tipo capacitivo</b>	<b>114</b>
<b>Figura 3.10. Circuito de medición de humedad</b>	<b>116</b>
<b>Figura 3.11. Gráfica de Voltaje con compensación de temperatura contra contenido de humedad</b>	<b>117</b>
<b>Figura 3.12. Esquema del medidor del contenido de humedad en granos</b>	<b>119</b>

<b>Figura 4.1. Diagrama general de los componentes de la planta Piloto</b>	<b>124</b>
<b>Figura 4.2. Diagrama general de los componentes del sensor</b>	<b>124</b>
<b>Figura 4.3. Motor de Inducción</b>	<b>126</b>
<b>Figura 4.4 Ventilador centrifugo</b>	<b>127</b>
<b>Figura 4.5. Dimensiones del ventilador</b>	<b>128</b>
<b>Figura 4.6. Dimensiones de la carcasa</b>	<b>128</b>
<b>Figura 4.7. Carcasa de acero galvanizado</b>	<b>129</b>
<b>Figura 4.8. Dimensiones del ducto</b>	<b>130</b>
<b>Figura 4.9. Vista lateral de la disposición de las resistencias eléctricas en el ducto</b>	<b>131</b>
<b>Figura 4.10. Zaranda para el secado de arroz</b>	<b>132</b>
<b>Figura 4.11. Arquitectura y dimensiones de la alberca</b>	<b>133</b>
<b>Figura 4.12. Disposición de los electrodos</b>	<b>136</b>
<b>Figura 4.13. Vista frontal y superior del soporte del elemento Primario</b>	<b>140</b>

<b>Figura 4.14. Elemento primario</b>	<b>141</b>
<b>Figura 4.15. Circuito en modo de medición 1</b>	<b>143</b>
<b>Figura 4.16. Circuito en modo de calibración 1</b>	<b>144</b>
<b>Figura 4.17. Circuito en modo de medición 2</b>	<b>145</b>
<b>Figura 4.18. Circuito en modo de calibración 2</b>	<b>147</b>
<b>Figura 4.19. Circuito en modo 1 de medición de humedad</b>	<b>148</b>
<b>Figura 4.20. Circuito equivalente de la etapa de medición de humedad</b>	<b>150</b>
<b>Figura 4.21. Análisis de las corrientes de la etapa de medición</b>	<b>151</b>
<b>Figura 4.22. Etapa de calibración y medición para el modo 1 de medición</b>	<b>153</b>
<b>Figura 4.23. Circuito en modo 2 de medición de humedad</b>	<b>154</b>
<b>Figura 4.24. Circuito equivalente en modo 2 de medición de humedad</b>	<b>155</b>
<b>Figura 4.25. Circuito en modo 2 de medición de humedad</b>	<b>157</b>
<b>Figura 4.26. Etapa de calibración y medición para el modo 2 de medición</b>	<b>158</b>

<b>Figura 4.27. Circuito de alimentación</b>	<b>159</b>
<b>Figura 4.28. Configuración del circuito de medición con valores reales</b>	<b>160</b>
<b>Figura 4.29. Curvas características del JFET</b>	<b>162</b>
<b>Figura 4.30. Parte frontal de la estructura física del medidor</b>	<b>166</b>
<b>Figura 4.31. Parte trasera de la estructura física del medidor</b>	<b>167</b>
<b>Figura 5.1. Temperatura del grano Vs tiempo de secado para la prueba N° 1</b>	<b>170</b>
<b>Figura 5.2. Temperatura del grano Vs tiempo de secado para la prueba N° 2</b>	<b>175</b>
<b>Figura 5.3. Curva característica de humedad Vs corriente para la calibración en línea con el electrodo de acero en modo de medición 1</b>	<b>179</b>
<b>Figura 5.4. Curva característica de humedad Vs corriente para la calibración en línea con el electrodo de acero en modo de medición 1</b>	<b>180</b>
<b>Figura 5.5. Curva característica de humedad Vs corriente para la calibración en línea con el electrodo de acero en modo de medición 2</b>	<b>184</b>
<b>Figura 5.6. Curva característica de humedad Vs corriente</b>	

para la calibración en línea con el electrodo de bronce en modo de medición 1	185
Figura 5.7. Curva característica de humedad Vs corriente para la calibración en línea con el electrodo de bronce en modo de medición 2	190
Figura 5.8. Curva característica de humedad Vs corriente para la calibración en el laboratorio con el electrodo de acero en modo de medición 1	191
Figura 5.9. Curva característica de humedad Vs corriente para la calibración en el laboratorio con el electrodo de acero en modo de medición 2	193
Figura 5.10. Curva característica de humedad Vs corriente para la calibración en el laboratorio con el electrodo de bronce en modo de medición 1	194
Figura 5.11. Curva característica de humedad Vs corriente para la calibración en el laboratorio con el electrodo de bronce en modo de medición 2	195
Figura 5.12. Comparación de calibraciones para el acero en modo de medición 1	196
Figura 5.13. Comparación de calibraciones para el acero en modo de medición 2	196
Figura 5.14. Comparación de calibraciones para el bronce en modo de medición 1	197

## TABLA DE ANEXOS

	Pág.
<b>Anexo A. MEDIDA DE HUMEDAD DE GRANO</b>	<b>211</b>
<b>Anexo B. Fast "INSPECTOR - ACCURATE" Tests Anywhere With The MOTOMCO Model 919 MOISTURE METER</b>	<b>215</b>
<b>Anexo C. MOISTUREMETER</b>	<b>218</b>
<b>Anexo D. ESPECIFICACIONES DEL MULTIMETRO UTILIZADO</b>	<b>223</b>
<b>Anexo E. CIRCUITO IMPRESO DE LA ETAPA DE MEDICIÓN</b>	<b>225</b>

A Dios por darme fuerza y sabiduría en los momentos difíciles. A mis padres Tulia y Hernando por creer en mi y apoyarme incondicionalmente en todas mis decisiones. A mis hermanos y familiares que siempre se esforzaron por brindarme lo mejor.

A Dios por su fiel compañía, amor y protección en cada momento de mi vida. A mis padres Iris y Calixto por el inmenso e inagotable amor que me brindan. A mi hermana Alina y a mi novia Mercy por su confianza y apoyo incondicional. A mis familiares y amigos por su ayuda desinteresada en especial a Dina, Ruth, Neyla, Vidal, Marti, Ángel y Manuel.

## **AGRADECIMIENTOS**

Los autores expresan sus agradecimientos a:

JORGE ELIECER DUQUE PARDO, Ingeniero electricista y director de la investigación, por sus valiosas orientaciones.

ALFREDO AMIN PRASCA, Economista, Gerente de la Agroindustria arrocera los Tamacos, por su colaboración y empeño en la ejecución del proyecto.

WILBER MANGA SALCEDO, Ingeniero electricista, Gerente de Equipos y Servicios Ltda., por su interés en el desarrollo y en el correcto funcionamiento del proyecto.

JAVIER ROMERO GELIZ, Técnico electricista, por su grandioso espíritu de colaboración, entusiasmo y carisma prestado en la elaboración del proyecto.

**Gracias**

## RESUMEN

El proyecto consiste en simular el proceso de secado de arroz con aire caliente en albercas y realizar su respectivo monitoreo de contenido de humedad en dichas albercas, mediante un sistema constituido por un elemento primario y un circuito medidor de humedad, permitiendo realizar un análisis del comportamiento de esta variable en el transcurso del proceso. Éste a su vez, involucra la aplicación de circuitos capaces de proporcionar valores de corriente, de acuerdo a variaciones en la resistividad del grano, originados por la extracción de humedad del arroz. Igualmente se busca una distribución del flujo de calor que permita simular el proceso bajo las condiciones típicas del secado.

Como primera medida, se estudia el proceso de secado de arroz, los factores que influyen en éste, los equipos empleados para su funcionamiento, las variables humedad y temperatura en el grano y el comportamiento de dichas variables durante el proceso. A partir de estos conceptos, se analizan los métodos de medición capacitivo y resistivo, sus características, principio de funcionamiento, ventajas y desventajas del mismo. Así mismo, se hace referencia a otros métodos de medición de humedad menos difundidos en Colombia y a métodos aplicados en algunos instrumentos de medición utilizados comercialmente.

Por otra parte, se realiza la descripción tanto de la planta piloto para la simulación del proceso de secado, como del medidor del contenido de humedad, haciendo énfasis en los componentes y principio de funcionamiento. Por último se lleva a cabo la calibración del equipo mediante pruebas realizadas en campo que garantizan la confiabilidad del instrumento.

Con el desarrollo de éste proyecto se pretende incrementar la productividad de las empresas arroceras del sector tanto local, regional y nacional de Colombia; esta mejora importante en la productividad viene a estar representada de manera directa y específica en los rendimientos de la materia prima (arroz en concha), mientras se esta procesando para convertirse en arroz blanco o producto final de consumo humano. Igualmente, disminuye el tiempo total de operación del proceso, mejora los procesos de control de calidad y genera la capacidad de reproducir y adaptar nuevas tecnologías.

## INTRODUCCIÓN

La determinación del contenido de humedad de los granos es considerada como una de las operaciones de mayor importancia en las distintas fases del tratamiento y procesamiento poscosecha del arroz, debido principalmente a su gran incidencia en la determinación de la calidad del mismo. El contenido de humedad en el grano, permite determinar su estado de madurez, el cual a su vez definirá no sólo la cantidad de materia seca que compone el grano, sino también establecerá el precio real de comercialización, y por tanto la productividad de las empresas arroceras del sector tanto local, regional y nacional de Colombia. De ahí, la importancia que representa contar con un sistema medidor de humedad, capaz de proporcionar valores reales operando bajo condiciones características del proceso de secado.

Los métodos estándares para la determinación del contenido de humedad, tales como el método de destilación, horno de vacío y de calor, entre otros, presentan dificultades al momento de realizar las mediciones en campo, adicionalmente son métodos relativamente lentos y algo tediosos. A partir de dichas desventajas, se

desarrollaron a mediados del siglo XX estudios e investigaciones, las cuales demostraron que tanto la resistencia eléctrica como la capacitancia del grano están correlacionadas con su contenido de humedad. Estos métodos alternativos brindan mayor rapidez en la lectura y determinación de la humedad.

Con el fin de tener un mejor control en la calidad final del grano, se hace necesario conocer el contenido de humedad en el momento que se está llevando a cabo el proceso de secado. Actualmente la medición del contenido de humedad en el grano de arroz, se desarrolla a través de equipos que sensan las propiedades eléctricas del grano y proporcionan el valor de la humedad del arroz en ambientes controlados, lo que hace que la medición, necesariamente se efectúe en instalaciones distintas a las dispuestas para llevarse a cabo el proceso de secado artificial en albercas. Lo anterior trae como consecuencia que se analicen muestras considerablemente pequeñas en comparación con las grandes cantidades de arroz que se manejan en las albercas típicas de secado artificial de granos. Este proceso de secado es una práctica ampliamente difundida, gracias a los beneficios que brinda tanto para el grano de arroz (al no maltratarlo), como a las instalaciones donde se trabaja con grandes cantidades de éste.

De esta forma, se pretende realizar un estudio general acerca de los principales métodos de medición de humedad del arroz, centrándose principalmente en el método de resistencia eléctrica, sus ventajas y desventajas en las mediciones de

humedad realizadas en línea, en comparación con los otros métodos existentes. Igualmente, se desarrollará un sistema medidor de humedad, el cual operará mientras se lleva a cabo el proceso de secado de arroz paddy o en concha, en una planta piloto encargada de simular las condiciones relevantes de las albercas típicas de secado de arroz.

Básicamente, el método del medidor resistivo de humedad opera bajo el principio de la variación de la conductividad debido al cambio de humedad del grano de arroz, el cual se puede apreciar en la disminución o aumento de la corriente en el circuito de medición.

La utilización de estos circuitos proporcionará información importante para alcanzar una alta eficiencia en el proceso del secado de arroz, al tener la posibilidad de brindar valores más representativos de humedad en cantidades de arroz relativamente grandes, además de la disminución de costos en aspectos eléctricos y comerciales, ofreciendo de esta forma, una alta calidad durante mediciones realizadas en línea.

## **1. GENERALIDADES DEL SECADO DE GRANOS EN COLOMBIA**

Hasta avanzada la década del 50, todos los granos de nuestro país se cosechaban casi secos. Estos se acumulaban en trojes cilíndricas, de alambre, o de otros materiales, y allí se terminaban de secar por acción del aire ambiente. Los vientos predominantes se llevaban la humedad excesiva, en uno o dos meses y posteriormente se realizaba el proceso de trilla.

Ante el trabajo de mano de obra que representaba el manejo de los granos envasados y los respectivos costos crecientes, hacia el principio de la década del 60 comenzó a generalizarse el manejo a granel de la producción de granos, eliminándose poco a poco el empleo de sacos. Ello significó un cambio fundamental en el manejo de los granos, pues se divulgaron los silos y los equipos de movimiento. A fines de dicha década ya se manejaba a granel la mayoría de la producción.

Desde ya hacía varios años, se habían popularizado las cosechadoras automotrices. Casi simultáneamente, o un poco después, se hicieron las primeras experiencias de cosecha temprana de algunos granos, por las ventajas que

reportaba esta práctica a los productores. Esa cosecha adelantada, significaba menos cantidad de plantas caídas, disposición del campo más tempranamente, posibilidad de mejores precios por disponer de mercadería en forma anticipada en los mercados, más seguridad de cosecha, etc.

Toda esta serie de adelantos en los métodos de recolección trae como consecuencia el problema de granos más húmedos, razón por la cual surgen, entonces, las secadoras, que se agregan a las instalaciones de acopio.

Las primeras instalaciones de secado artificial, se fabricaron en tandas de pequeña capacidad para que fueran usadas por los agricultores, o por los contratistas de cosecha, en los momentos que se efectuaba la recolección.

## **1.1 FACTORES QUE INFLUYEN EN LA CONSERVACIÓN DE LOS GRANOS**

En Colombia, el aumento de la producción de granos ha obligado al desarrollo y adaptación de técnicas de conservación de granos, con resultados diversos, y que, aun se deben mejorar.

En todos los granos se producen cambios, que, con muy pocas excepciones, son perjudiciales. El objeto de las técnicas de conservación es mantener la calidad,

disminuyendo los cambios. Son varios factores que determinan el comportamiento de los granos, los principales son:

ض Humedad del grano.

ض Temperatura ambiente.

ض Temperatura del grano.

ض Forma y duración del almacenaje.

## **1.2 HUMEDAD DE LOS GRANOS**

La humedad es el factor más importante que se requiere controlar para que un grano se conserve en forma adecuada, debido a que la actividad biológica depende principalmente de dicho factor.

Los granos están conformados en su estructura más simple en materia seca y agua. El contenido de agua de un producto se expresa en forma de porcentaje, es decir, que el porcentaje de humedad expresado se refiere a la proporción de humedad relacionada con el peso total del grano formado por la materia seca y el agua contenida en él.

Para calcular cualquier cambio en el contenido de humedad en grano, debe tenerse presente que su materia seca permanece constante durante los procesos de secamiento. En consecuencia:

$$\frac{100 - H_1}{100} * P_1 = \frac{100 - H_2}{100} * P_2 \quad (1.1.)$$

Donde:

H = Humedad.

P = Peso.

Los granos, como es bien conocido, no pueden conservarse almacenados si no están secos. El factor esencial, es determinar cuándo un grano se considera "seco". Como término general, para los cereales, una humedad del 15% se considera el límite para estimarlo como "seco". Pero este valor es relativo, pues depende de diversos factores.

En un país de clima frío, un cereal puede conservarse a 15% de humedad, pero en un país de clima cálido, la humedad de conservación deberá ser de 12 - 13%.

En todo organismo biocoloidal, como los granos, pueden distinguirse tres tipos de agua, según el tipo y magnitud de las fuerzas de adherencia que actúan entre el agua y la materia seca.

El **agua libre** o **absorbida** depositada simplemente en la superficie del grano, o en sus espacios intergranulares y poros, no tiene ninguna vinculación con las moléculas de la sustancia absorbente, salvo que las utiliza como estructura de apoyo.

El **agua adsorbida**, se encuentra unida más firmemente a la materia seca; las moléculas de agua interactúan con las de la sustancia y, en consecuencia sus propiedades se afectan. Ésta se comporta en forma diferente al agua líquida, su presión de vapor es menor; como puede comprobarse por el hecho que la cantidad de agua que contiene una atmósfera en equilibrio con grano, es menor que la que tendría, si estuviese en equilibrio con agua libre. Cuando el contenido de humedad del grano es menor, más fuerte es la unión entre la sustancia y el agua, y menor la influencia que esta ejercerá sobre la atmósfera circundante. El agua adsorbida puede separarse del grano variando las condiciones de humedad del aire que lo rodea.

Por otra parte, el **agua de constitución** combinada con uniones químicas forma parte de la misma sustancia.

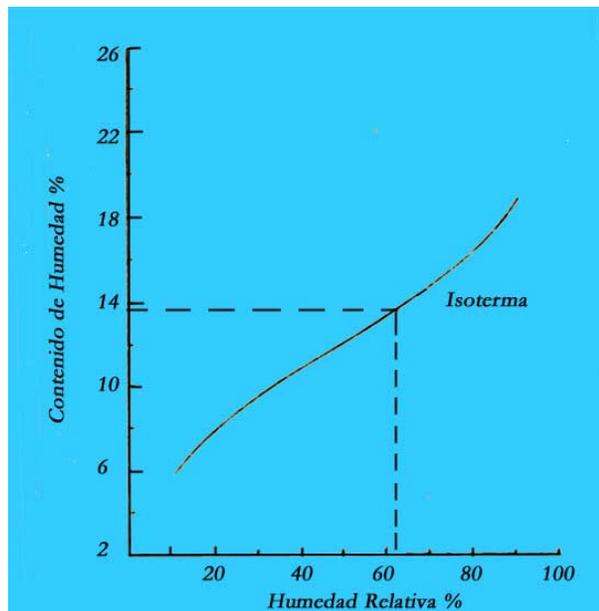
No existe una separación clara entre los tipos anteriores de agua. En granos de humedad baja, el agua se une firmemente a la sustancia por fuerzas de atracción molecular, pues tiene un dipolo grande por unidad de superficie que, es fuertemente atraído por la variedad de iones y grupos polares que contienen los cereales. Si se incrementa la cantidad de **agua adsorbida**, disminuyen las fuerzas de atracción hasta que igualen a las fuerzas capilares de absorción.

Se busca definir un límite que separe toda el agua absorbida sin afectar la de constitución, cuya extracción desnaturalizaría el grano. Todo método de medición de humedad tiene, en consecuencia, bases empíricas definidas en forma tal, que los resultados sean reproducibles e indiquen con adecuada aproximación cualquier cambio en el contenido de humedad causado por secamiento o humedecimiento.

### **1.3 HIGROSCOPICIDAD EN EL GRANO DE ARROZ**

Los granos, como organismos coloidales, tienen características higroscópicas, es decir, absorben o entregan humedad a la atmósfera que los circunda hasta que encuentran el equilibrio con ella. Los materiales higroscópicos contienen humedad adsorbida que ejerce una presión de vapor inferior a la del agua líquida a la misma temperatura.

La relación que existe para cada tipo de grano, entre el contenido de humedad y la humedad atmosférica de equilibrio, ha sido estudiada; observando que la relación humedad relativa-humedad del grano, a una determinada temperatura, se puede representar por una curva sigmoide, cuya pendiente aumenta sensiblemente cuando la humedad relativa es del 80%. La figura 1.1 ilustra una de estas curvas, conocidas como Isotermas.



**Figura 1.1. Relación entre la humedad relativa y el contenido de humedad**

Se puede diferenciar tres tipos de humedad característica en los granos, las cuales son:

➤ **Humedad de equilibrio** La humedad de equilibrio, corresponde al punto en el cual la humedad relativa se iguala al contenido de humedad del grano.

En el comportamiento de los granos almacenados, la humedad relativa de equilibrio tiene mayor importancia que el contenido de humedad del grano, pues indica la disponibilidad de humedad para el desarrollo de los microorganismos, de cuyo nivel de actividad depende la seguridad del grano.

➤ **Humedad en base húmeda y Humedad en base seca** Se sabe que la medición de la humedad del grano se fija sobre la llamada "base húmeda", es

decir, la cantidad de agua que tiene el grano en total, sobre su peso de materia seca mas agua. Éste es el dato que proporcionan los humidímetros comunes usados en el comercio.

Pero en ciertas operaciones, sobre todo para trabajos científicos, es preferible usar la humedad en "base seca", que es la cantidad de agua que tiene el grano en relación solamente a la cantidad de materia seca. Esta humedad será siempre mayor que la anterior.

La humedad en base húmeda, tiene el inconveniente que hace necesario realizar algunos cálculos para conocer la pérdida de humedad por secamiento, pues la reducción numérica de humedad no es igual a la pérdida en peso.

#### **1.4 SECADO DEL GRANO DE ARROZ**

El secamiento normalmente se define como la extracción de agua contenida dentro de sólidos por medios térmicos. En el grano de arroz, éste es un proceso que combina el intercambio de masa y calor.

El calor que se aplica al grano aumenta la presión de vapor de la humedad interna y la hace migrar hacia la superficie, donde en forma gaseosa se combina con el aire. Como el traslado de la humedad del interior del grano es más lento que la

evaporación de la superficie, se establece dentro del grano un gradiente de humedad; la temperatura aplicada en el exterior del grano tampoco se transmite inmediatamente al interior, de tal manera que se establece otro gradiente, esta vez de temperatura, que junto con el de humedad, debe mantenerse dentro de los niveles controlados para evitar las fisuras que se producen por la naturaleza frágil del grano de arroz.

**1.4.1 Sistemas de secado** Una de las etapas del proceso de tratamiento del grano de arroz que asegura la eficiencia de la calidad del producto es el secamiento artificial del arroz, el cual constituye un "cuello de botella" para la mayoría de las plantas de acopio, sobre todo aquellas ubicadas en las regiones en donde la recepción del grano se lleva a cabo en un período muy corto.

Los sistemas de secado del arroz usados en los países andinos, incluyen diferentes tipos de tecnología; desde secado al sol, en las zonas costeras secas de Perú y en pequeños pueblos del Ecuador, pasando por sistemas más evolucionados como el desarrollado por "Lister", llamados albercas de secado que son usados principalmente en Colombia y Ecuador, hasta los secadores de columna, típicos de Venezuela.

La experiencia en Colombia demostró que las unidades de secado vertical pueden ser usadas para hacer una primera reducción de la humedad – presecado - (entre 4% y 5% de humedad), sin afectar el rendimiento del grano.

Actualmente, en Colombia y Ecuador, las piscinas tradicionales se han mejorado substancialmente: La carga y descarga se hacen mecánicamente, poseen un fondo inclinado con rejilla, y el manejo del grano se realiza mediante bandas transportadoras.

Entre los sistemas de secado de mayor difusión se encuentran:

- Secado en patios.
  - Con aire frío en silos de fondo plano perforado.
  - Con aire caliente en silos de fondo plano perforado.
  - En máquinas secadoras con torre de flujo continuo.
  - Combinando el secado de torre de flujo continuo con el sistema con silos de aire caliente.
- 
- **Secado en patios** Proceso rudimentario y de rendimientos bajos, en el que se requieren más de 70 m<sup>2</sup> para secar una tonelada de arroz, extendida sobre un patio de cemento y expuesta a la acción del sol.

El secado en patios requiere bastante mano de obra si se desea manejar cantidades de alguna importancia y la calidad disminuye considerablemente con el arrastre y temperaturas variables que recibe.

➤ **Secado con aire frío** Es un sistema recomendable para granjas pequeñas en zonas secas. Se utiliza un ventilador para soplar aire por debajo de la masa de grano. El recipiente se construye con un fondo falso perforado de malla fina.

El paso del aire produce enfriamiento por capas en el grano, capas que van ascendiendo en forma lenta por toda la masa. Este frente de enfriamiento es seguido varios días, o semanas, después por un frente de secamiento. Sin importar el volumen de aire utilizado, el enfriamiento y secado siempre se realizan como se describe en la figura 1.2.

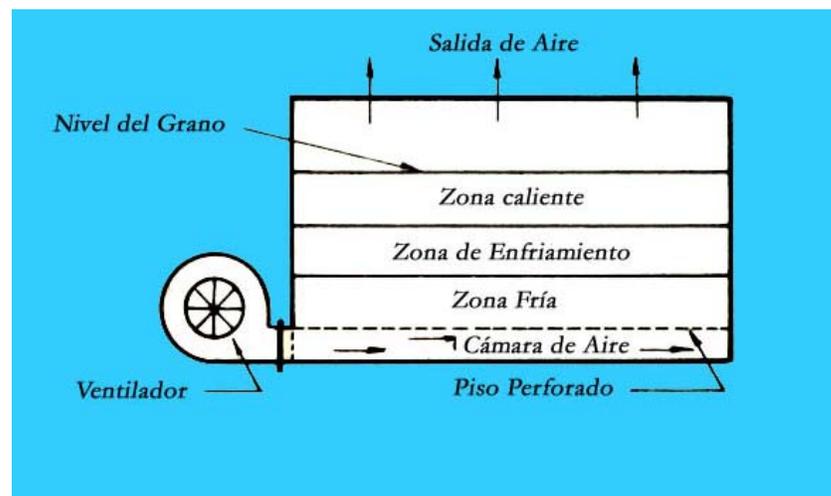


Figura 1.2. Secado con aire Frío

El principal inconveniente del sistema está en el tiempo de secado, que, dependiendo de las condiciones ambientales, temperatura inicial del arroz y del espesor de la capa de grano, puede variar entre una semana, 2 ó 3 meses.

El aumento del espesor de grano incrementa la resistencia ejercida al paso del aire y exige aumentos más proporcionales en el tamaño y potencia de los ventiladores.

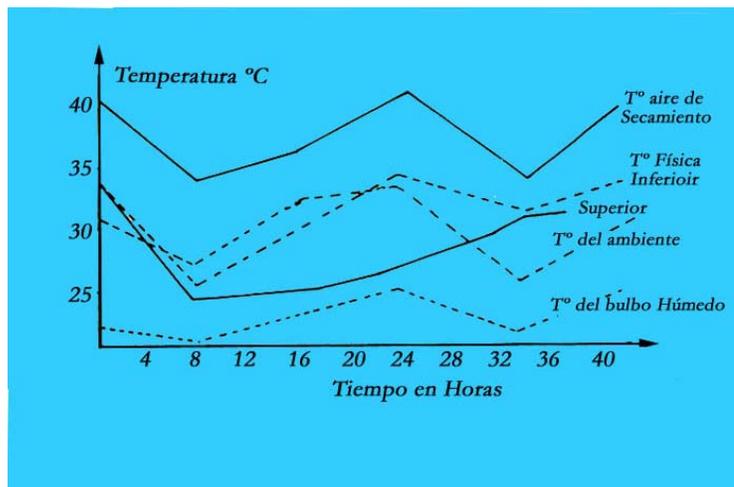
➤ **Secado en silos con aire caliente** Prácticamente la totalidad de las secadoras de granos utilizadas comercialmente, remueven la humedad con la ayuda de aire caliente que atraviesa el grano depositado en un recipiente adecuado.

En el medio colombiano este sistema, que utiliza estructuras similares a las descritas anteriormente, se usa con muy buenos resultados en instalaciones de todo tamaño.

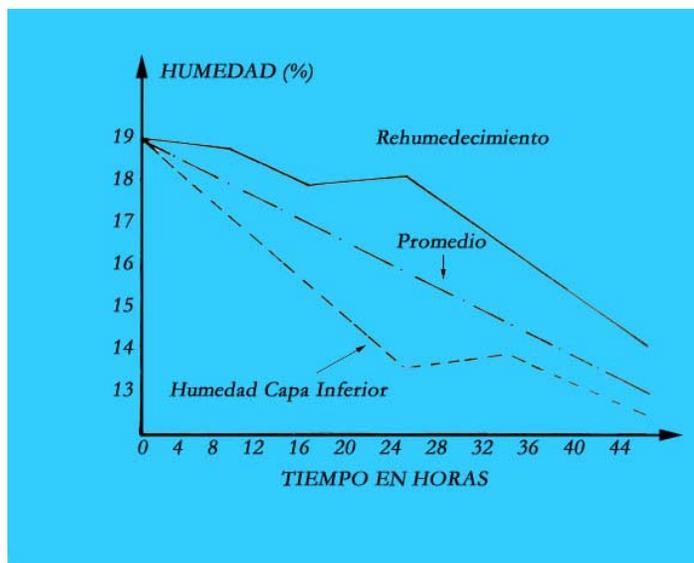
Este sistema se basa en calentar el aire para reducir su humedad relativa y aumentar de esta manera la capacidad de retener humedad sin que ésta se condense, igualmente la baja humedad relativa hace al aire ávido de la humedad de los granos que se coloquen en su camino.

Existen varios factores que se deben analizar al momento del secado de arroz con este tipo de sistema de secado, uno de los cuales es el gradiente de humedad, el cual aumenta con el espesor de la capa de grano que se utilice; con 1.10 metros, la diferencia de humedad entre la parte superior y la inferior, puede ser de 1% a 1.5%; si el espesor se aumenta a 1.5 metros, la diferencia puede llegar a ser de 2.5%. Si se prolonga por tiempo suficiente el secado, todo el grano adquirirá la misma humedad, la de equilibrio con la humedad relativa del aire.

En las figuras 1.3. y 1.4., se analiza el comportamiento de la humedad y la temperatura de las capas superior e inferior del grano, en un silo con capa de grano de 1.2 metros y 7.5 CFM/Bushell, en un sitio de humedad relativa promedio de 50%.



**Figura 1.3. Comportamiento de la Temperatura**



**Figura 1.4. Comportamiento de la Humedad**

En la figura 1.3., se aprecia que la temperatura del grano situado en la parte inferior del silo, tiende a seguir las variaciones de la temperatura ambiente.

En las primeras horas de secado, cuando descendía la temperatura ambiente, el grano de las capas inferiores se enfrió con mayor velocidad por el efecto de refrigeración de la rápida evaporación. Generalmente, cuando la humedad relativa no es demasiado baja, la temperatura de esta capa es inferior a la ambiente. El arroz situado en la parte superior del silo tiene un comportamiento diferente; en condiciones normales, ya sea que la temperatura ambiente esté aumentando o disminuyendo, la temperatura del grano tiende a descender las primeras 8 ó 10 horas a un nivel intermedio entre la temperatura ambiente (bulbo seco) y la de

bulbo húmedo, nivel que será más cercano a esta última al disminuir la humedad relativa.

Después de esta etapa inicial se inicia un ascenso gradual, cuya velocidad depende de la humedad relativa; si ésta es baja (por ejemplo 30%), la temperatura puede estabilizarse durante 15 ó 20 horas y continuar luego acercándose a la temperatura física inferior a la del aire de secado.

La figura 1.4. muestra el comportamiento de la humedad del grano en las capas superior e inferior durante el secado.

➤ **Humedad de las capas inferiores** Desciende en forma rápida inicialmente, de tal manera que en sólo 14 horas podría removerse la mitad de la humedad deseada. La velocidad de evaporación disminuye posteriormente un poco, de tal manera que podría tenerse arroz de “punto” en 30 ó 35 horas.

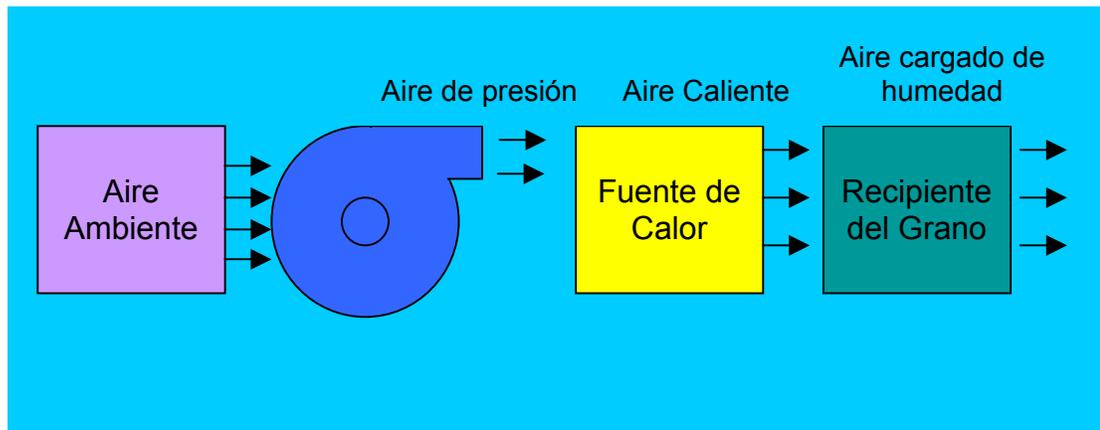
➤ **Humedad de las capas superiores** Inicialmente desciende con una velocidad un poco menor que la de las capas inferiores; después de 12 a 15 horas se presenta un aumento de humedad por la rápida evaporación de los granos de las capas inferiores y por condensación del aire de salida que se ha calentado. Esta etapa, de ganancia de humedad, puede durar entre 8 y 16 horas y es seguida por una nueva etapa de pérdida de humedad continua, hasta llegar al nivel deseado.

**1.4.2 Equipos mecánicos y combustibles utilizados en el secado con aire caliente** Como se puede apreciar en el diagrama de bloques de la figura 1.5. se esquematizan los elementos básicos de una secadora:

- Un ventilador para poner en movimiento una cantidad determinada de aire ambiente.

Ventilador

- Una fuente de calor que utilice cualquier tipo de combustible para elevar la temperatura del aire.
- Un recipiente donde se ubicará el arroz al cual se le aplicará el proceso de secado.



**Figura 1.5. Elementos básicos de un sistema de secado**

La arquitectura generalmente utilizada para los métodos de secado por aire caliente en silos o albercas se muestra en la figura 1.6.

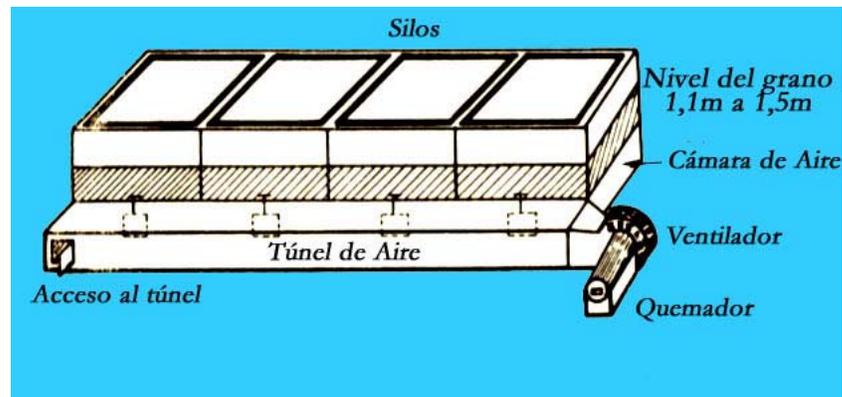


Figura 1.6. Sistema de secado por aire caliente en albercas

El cargue y descargue de las albercas puede mecanizarse completamente, si se construyen inclinados, como se indica en la figura 1.7.

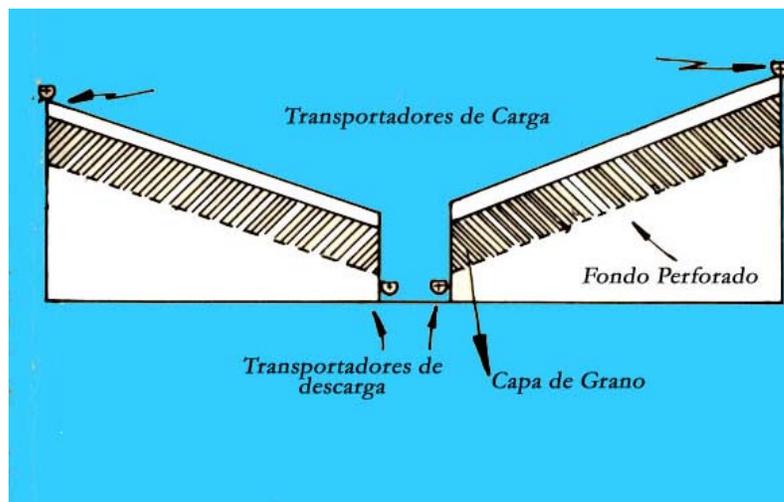
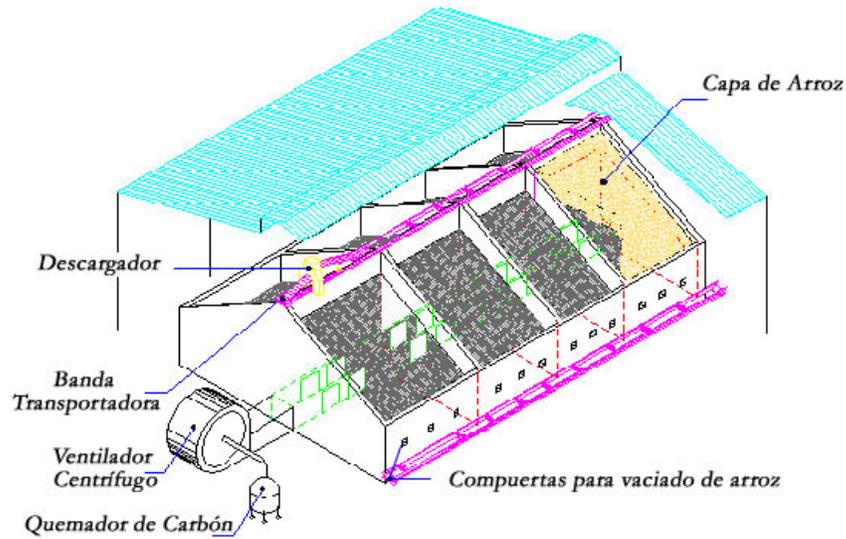


Figura 1.7. Albercas inclinadas para el secado de arroz

**1.4.2.1 Ventiladores** Para generar la corriente de aire se utilizan ventiladores de tipo axial o centrífugo. La instalación típica de este sistema utiliza ventiladores con motores de 50 a 60 HP, que fuerzan un volumen de aire de 4.8 a 6 m<sup>3</sup> en

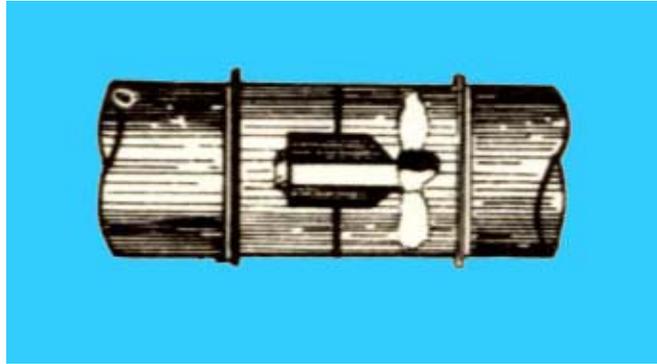
instalaciones de 4 ó 5 albercas, con una capacidad total de 90 a 120 toneladas  
Como se muestra en la figura 1.8.



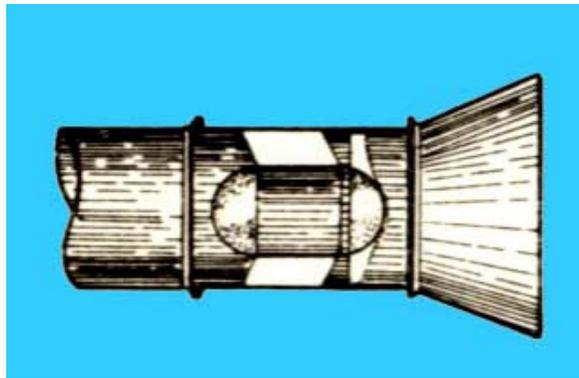
**Figura 1.8. Planta del proceso de secado de arroz en albercas**

Los ventiladores axiales, como su nombre lo indica, mueven el aire paralelamente a su eje y forman un ángulo recto con el plano de rotación de sus aspas. Se construyen principalmente en dos tipos, tubo-axiales y vano-axiales (Figura 1.9. y Figura 1.10.). Frecuentemente, en ambos tipos, las hélices se montan directamente sobre el eje del motor eléctrico.

En el tipo vano-axial se utilizan álabes guías que actúan como rectificadores de flujo del aire y reducen las pérdidas que producen las turbulencias. Los ventiladores axiales se utilizan, preferentemente, para mover volúmenes reducidos o medianos de aire contra presión relativamente baja.

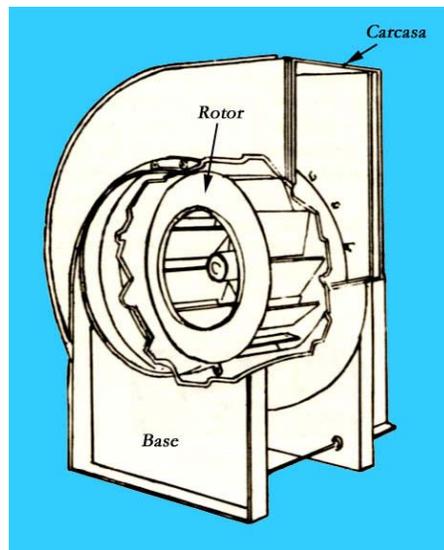


**Figura 1.9. Ventilador tubo-axial**



**Figura 1.10. Ventilador vano-axial**

En los ventiladores centrífugos, parte de la energía que se usa para producir la presión se genera por acción centrífuga. El aire penetra al ventilador paralelamente al eje y se mueve a través de los álabes. Su descarga se hace tangencialmente a la carcasa envolvente como se muestra en la figura 1.11.



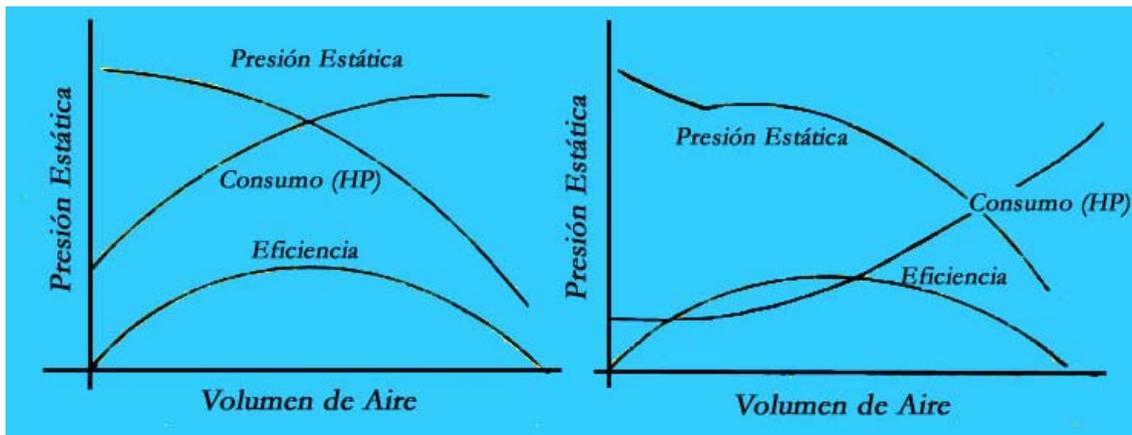
**Figura 1.11. Ventilador centrífugo**

Los álabes se construyen según su diseño en: inclinados hacia atrás, para conformar los ventiladores de tipo no sobrecargable e inclinados hacia adelante característicos de las unidades sobrecargables.

En la figura 1.12. se ilustra gráficamente el comportamiento característico de los dos tipos de ventiladores. Los no sobrecargables presentan una curva de presión estática estable y un punto máximo claro de consumo de potencia, mientras en los sobrecargables la presión estática tiene una zona de comportamiento errático y el consumo de potencia aumenta en forma apreciable al disminuir la resistencia impuesta al ventilador (presión estática). Los ventiladores de tipo sobrecargable exigen motores con amplio margen de potencia, especialmente en aquellas instalaciones de carga variable.

Los ventiladores axiales, son generalmente inestables en su operación y rendimiento, y después de cierto punto, tienen características sobrecargables.

La escogencia de un ventilador para una determinada aplicación, debe hacerse de acuerdo con las características del sitio en el cual se va a trabajar, el volumen de aire total por unidad de tiempo, la presión estática que se necesita vencer para mover el volumen de aire a través del sistema, las variaciones de resistencia al paso del aire que se pueden presentar durante la operación, etc.



**Figura 1.12. Curvas típicas de ventiladores**

**1.4.2.2 Fuentes de calor** En los procesos de secamiento industriales, para la generación de calor se utilizan varios tipos de combustibles; éstos proporcionan una combustión térmica eficiente, además de facilitar el control de la temperatura de secado, obteniendo una mejor calidad del grano.

**1.4.2.2.1 Cascarilla de arroz** El aumento de precio de los combustibles líquidos, renovó el interés en la utilización de combustibles no tradicionales para el secado de granos. Naturalmente la presión económica para el rápido desarrollo de combustibles alternativos, fue la mayor en aquellos países no productores de petróleo, que, además, tampoco tuvieran en el carbón o gas natural, una alternativa viable.

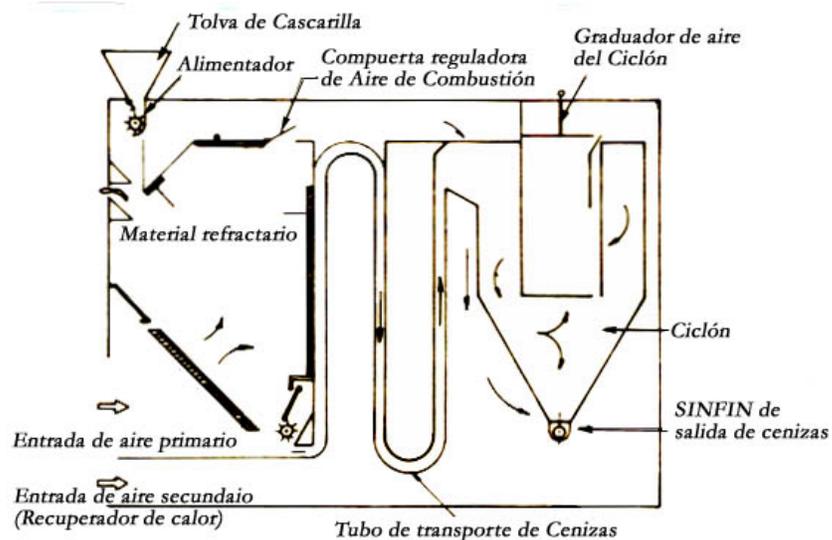
La tecnología para la quema de la cascarilla, ha servido de base para el desarrollo de sistemas mejorados que, mientras mantienen intacta la simpleza del diseño, permiten calentar los mayores volúmenes de aire de las grandes instalaciones, con hornos de tamaño reducido.

➤ **Quemadores de Super Brix** Los quemadores de cascarilla fabricados por la compañía Super Brix de Barranquilla, Colombia, constituyen la base del actual desarrollo del país en la utilización de este combustible para el secado de granos.

El diseño de los quemadores de Super Brix es básicamente una unidad de fuego directo, provista de un ciclón intermedio para la separación de cenizas y suministro de una corriente de aire purificado para el secado de granos. Todo el sistema está circundado por una camisa de aire en movimiento, que lo refrigera y recupera calor, mejorando así su eficiencia térmica.

La cascarilla se alimenta en forma continua desde una tolva (cargada a su vez en forma mecanizada) mediante un sistema giratorio de velocidad variable; la combustión se realiza sobre una parrilla inclinada. Un ciclón colocado en la sección final del cuerpo del quemador, decanta las cenizas y las cascarillas a medio quemar, entregándolas a un sinfín evacuador. El aire caliente purificado se entrega a la secadora por medio de ductos metálicos provistos de compuertas para adicionar aire frío.

El quemador dispone de varias compuertas de aire que permiten regular la admisión de aire para la combustión y transporte neumático.

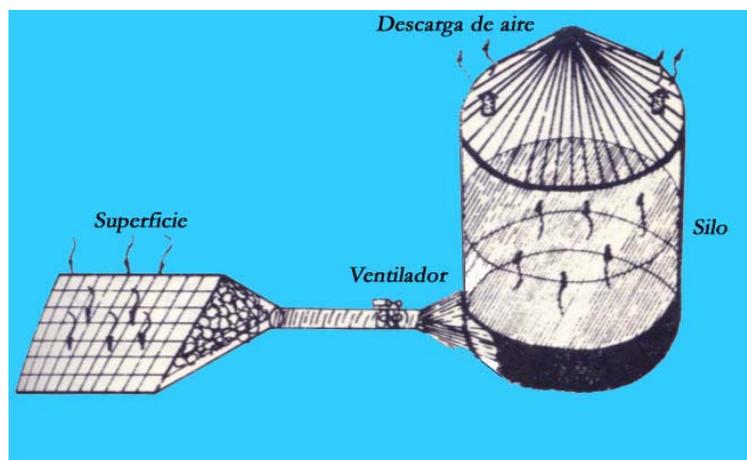


**Figura 1.13. Quemador Super Brix**

La regulación de la temperatura de secado se hace principalmente variando la velocidad de alimentación de la cascarilla de acuerdo con las lecturas del termómetro colocado en los ductos de entrada de aire caliente de la secadora.

➤ **Quemadores de energía solar** Su utilización se encuentra aún en etapa de desarrollo inicial. El problema principal, en el momento, estriba en encontrar la forma de almacenar económicamente el calor del sol de los días claros, para utilizarlo durante las noches y días nublados.

Se han utilizado con algún éxito varios materiales para almacenar el calor, la piedra por ejemplo tiene un calor específico relativamente alto (0.20) de tal manera que 50 metros cúbicos en un día soleado, son suficientes para evaporar aproximadamente 500 libras de agua. En la figura 1.14 se ilustra el sistema.



**Figura 1.14. Colector de calor solar de piedras**

**1.4.3 Etapas del secamiento del grano de arroz** Pueden distinguirse tres etapas principales durante el secado de granos. La primera etapa, llamada etapa de calentamiento, se caracteriza porque en ella la velocidad de evaporación aumenta conforme el grano se va calentando.

En la segunda etapa, de velocidad constante, el secamiento tiene lugar en la superficie del producto que se mantiene húmeda en su totalidad; la velocidad de secado en esta etapa es independiente de las características internas del grano y es controlada fundamentalmente por las características del aire desecante. La velocidad está determinada por la rata de difusión del vapor de agua, a través de la película de aire estancado que envuelve los granos hasta la corriente de aire principal.

El coeficiente de transferencia de calor y masa depende principalmente del espesor de la película de aire que envuelve el grano, espesor que disminuye al aumentar la velocidad de aire.

Por último, donde la superficie deja de permanecer completamente húmeda, se denomina en ocasiones punto crítico e indica el inicio de la tercera etapa de velocidad decreciente, etapa que a su vez puede subdividirse en dos partes: una primera en la cual la superficie aun presenta partes húmedas y otra en la cual se encuentra completamente seca. En la primera parte la velocidad de secado depende de las condiciones tanto del aire como de las características físicas del grano; en la segunda parte depende de las características del grano, que determinan el tiempo de difusión de la humedad interna; todo intento que se haga por acelerar el secamiento, utilizando temperatura más elevada o mayor volumen de aire, produce daños internos, al obligar a la humedad a desplazarse más

rápidamente, abriendo en cierta forma nuevos caminos que producen inevitablemente daños físicos.

La figura 1.15 relaciona la velocidad de secado con la duración del proceso y permite distinguir muy claramente las tres etapas.

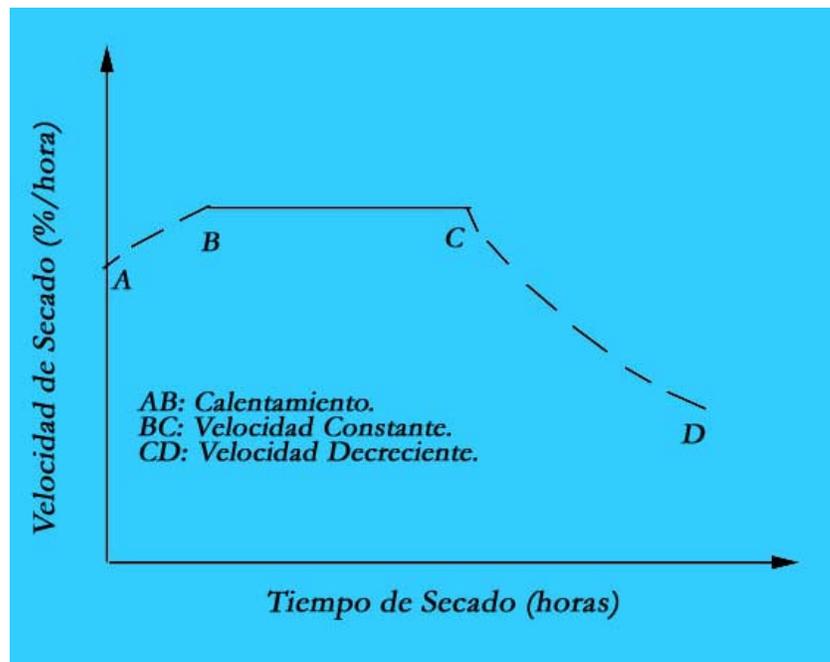


Figura 1.15. Curva de secado de materiales higroscópicos

**1.4.4 Velocidad de secado** Generalmente se define el secado como la remoción de agua contenida en sólidos por medios térmicos. El secamiento artificial utiliza en casi todos los casos un proceso de convección forzada de aire caliente, para el transporte de calor y evacuación de la humedad.

La velocidad de secado es proporcional a la diferencia de presión de vapor del medio desecante y de la humedad en la superficie del producto, a la superficie expuesta y al coeficiente de transferencia de masa, coeficiente que indica la resistencia por unidad de área que ejerce la película de aire situada en la periferia del grano, al flujo de masa de agua.

Cuando se seca un grano, ocurren simultáneamente dos procesos diferentes: transferencia de calor para evaporar el agua, y transferencia de masa en forma de humedad interna que se difunde, y de líquido que se evapora y remueve de la superficie. Los factores que gobiernan cada uno de estos procesos determinarán la velocidad de secado.

Los movimientos internos de humedad pueden ser de varios tipos, dependiendo de la estructura del grano; algunos serán de difusión pura, otros de flujo capilar o causado por la acción mecánica de la contracción del grano.

**1.4.4.1 Efectos físicos del secado rápido** Cuando se emplea la secadora, se originan algunas pérdidas de grano, como roturas y producción de polvo, además de fisuras internas, que durante el proceso de pilado se convierten en fracturas que aumentan la cantidad de grano partido.

La pérdida más importante es el sobresecado. Algunos cerealistas realizan un sobresecado, para tener una mayor seguridad de almacenamiento, o para reducir los problemas de "revenido" cuando despachan inmediatamente la mercadería a puerto.

El sobresecado puede tener alguna ventaja cuando se vende grano al exterior, pues los compradores extranjeros obtienen una mercadería más seca, más segura, no están pagando agua y requieren menos volúmenes de transporte para un mismo tonelaje. La diferencia favorable para el vendedor se establecerá si los compradores están dispuestos a pagar un precio extra por ese sobresecado.

Pero el sobresecado tiene otro costo extra: el mayor consumo de energía, que aumenta en mayor proporción cuanto más bajo es el contenido de humedad final.

**1.4.5 Aspectos técnicos sobre el secamiento de arroz** El secamiento artificial de granos se desarrolló en sus comienzos sobre bases empíricas; las secadoras mecánicas se construyeron y mejoraron de acuerdo con resultados prácticos, sus fundamentos teóricos solo se estudiaron años mas tarde.

Para completar la visión global del almacenamiento de granos, se desarrollaran aspectos teóricos de secamiento y almacenaje de granos.

Prácticamente la totalidad de las secadoras utilizadas comercialmente para granos, transportan el calor para la evaporación por “convección” utilizando aire en movimiento.

Naturalmente en toda secadora, una pequeña parte del secamiento se realiza por “conducción” de calor por sus paredes y aún por “radiación” en algunos casos.

La utilización de aire como medio desecante generalizado, hace necesario el estudio de sus principales características.

➤ **Psicrometría** El aire es una mezcla de proporciones variables de aire seco y vapor de agua. Se denomina psicrometría (literalmente medición de frío) al estudio de las temperaturas de bulbo húmedo y bulbo seco, que permiten determinar las variaciones de humedad del aire.

El aire seco contiene principalmente oxígeno y nitrógeno y algunos otros componentes menores; el vapor de agua, que además contiene el aire atmosférico, aunque no representa nunca más de un 10% de peso del aire, tiene efectos muy importantes en los procesos de secado; para indicar su contenido en él, se usan tres medidas principalmente: presión de vapor, humedad relativa y humedad absoluta.

➤ **Presión de vapor (P.V.)** La presión total que ejerce el aire atmosférico (barométrica), está formada por la suma de la presión parcial del aire seco, más la presión parcial del vapor presente, asumiendo que el aire y el vapor de agua se comportan como gases perfectos y de acuerdo con la ley de las presiones de Gibbs – Dalton, que establece que la presión parcial es determinada únicamente por el volumen y temperatura de la mezcla sin influencia de los otros componentes. El error que se introduce al suponer que en el aire los componentes se comportan como gases perfectos para las temperaturas utilizadas en el secamiento de granos, no alcanza a ser del 1%.

El agua, como todos los líquidos, tiende a saturar con su vapor todo el espacio que lo rodea; cuando se llega al nivel de saturación la presión de vapor depende únicamente de su temperatura.

El cuadro siguiente muestra los valores de presión de vapor al nivel del mar y para las temperaturas más utilizadas en el secado de granos.

**Cuadro 1.1. Presión de vapor para varias temperaturas**

<b>TEMPERATURA (BULBO HUMEDO) °C</b>	<b>PRESIÓN DE VAPOR (P.V) Psia</b>
10	0.178
15	0.247
20	0.339
25	0.459
30	0.615
35	0.835
40	1.069
45	1.390
50	1.789
55	2.282
60	2.880
65	3.627
70	4.519
75	5.591
80	6.868
85	8.383
90	10.168

La presión de vapor para aire no completamente saturado, se puede calcular simplemente multiplicando su presión de vapor saturado por su humedad relativa (HR).

En la mayor parte de los casos prácticos, el vapor presente en el aire está recalentado, es decir tiene una temperatura superior a la de su saturación. Así aire a 80°C y 60% de humedad relativa, tendrá una presión de vapor de:

$$P.V = 6.868 * 0.6 \quad (1.2.)$$

$$P.V = 4.120 \text{ PSI} \quad (1.3.)$$

Presión a la cual corresponde una presión de saturación de aproximadamente 68°C. Es decir el vapor está recalentado en 12°C.

➤ **Humedad Relativa (HR)** La relación entre la masa de vapor presente en un volumen dado de aire y la masa de vapor que existiría en el mismo volumen de aire, y en iguales condiciones de temperatura y presión, cuando está completamente saturado de agua, se denomina humedad relativa y es numéricamente igual a la relación de las presiones de vapor del aire de la muestra y del aire completamente saturado. La humedad relativa se expresa normalmente como un porcentaje.

➤ **Humedad Absoluta** Su valor indica directamente la masa de vapor de agua que contiene cada unidad de aire seco; para el secamiento de granos, su valor normalmente varía entre 0.005 y 0.2 Kilos de agua por Kilo de aire seco.

➤ **Temperatura y Calor** La temperatura de un cuerpo indica su nivel de actividad molecular; en el aire es un índice de su capacidad desecante y de la cantidad de calor que transporta.

La unidad de medida de calor en el sistema métrico es la caloría, que se define como la cantidad de calor necesaria para aumentar la temperatura de un grano de agua en un grado centígrado; en los cálculos prácticos se utiliza con mayor

frecuencia la Kilocaloría, para evitar el manejo de números muy grandes; en el sistema inglés de unidades se utiliza la BTU que equivale a aproximadamente a 4 kilocalorías.

La cantidad de calor presente en el aire húmedo, por unidad de masa de aire seco se denomina entalpía ( $h$ ) del aire, y está formada por la suma de entalpías del aire seco y del vapor de agua asociado. Su valor en sí mismo no tiene ningún significado práctico, solamente su comparación con otras entalpías relacionadas en el proceso, proporciona resultados útiles. Normalmente la entalpía del aire seco se mide utilizando una temperatura de 17.8 °C y la del vapor de agua con 0°C.

El calor específico ( $C$ ) de una sustancia se define como la cantidad de calor que debe suministrársele a su unidad de masa, para aumentar su temperatura en 1 °C; de tal manera que para un cuerpo de masa  $M$  y cuya temperatura se modifique en  $\Delta T$ , la cantidad de calor ( $Q$ ) suministrada, o extraída, será:

$$Q = M * C * \Delta T \quad (1.4.)$$

El calor específico del aire seco es de 0.24 caloría/gramo °C, de tal manera que la entalpía correspondiente al aire seco por libra ( $h_a$ ) será de:

$$h_a = 0.24(T - T_0) \quad (1.5.)$$

Como ya se mencionó, el vapor asociado al aire está normalmente recalentado, en un valor igual a la diferencia entre su temperatura y la de su punto de rocío ( $T - T_r$ ), de tal manera que su entalpía ( $h$ ) será igual a la suma de la entalpía del agua líquida, a la temperatura de rocío ( $h_f$ ), más el calor que fue necesario añadirle para convertirla en vapor ( $h_{fg}$ ), denominado calor latente de evaporación, más el calor necesario para recalentar el vapor en  $T - T_r$  grados.

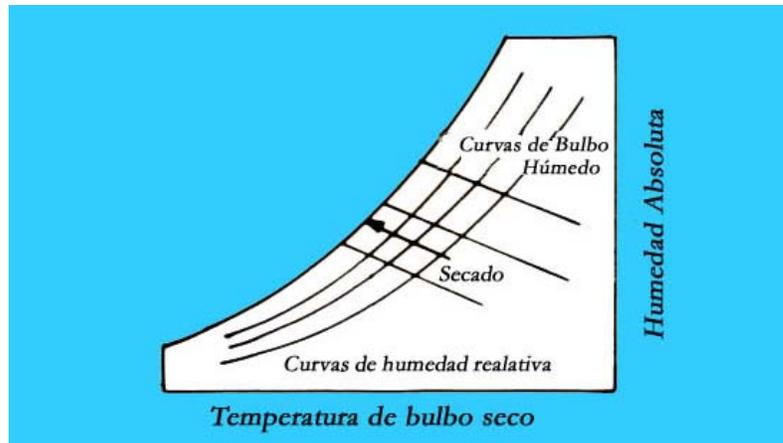
La cantidad de agua presente por kilo de aire seco es la humedad absoluta ( $H_{abs}$ ); el calor específico del vapor es 0.45 calorías/gramo °C y el del agua es igual a 1 por definición. En consecuencia:

$$h = 0.24(T - T_0) + H_{abs}[0.45(T - T_r) + h_{fg} + (T_r - T_0)] \quad (1.6.)$$

En los Estados Unidos son muy utilizadas las cartas psicrométricas, que utilizan en uno de los ejes coordenados la humedad absoluta y en el otro la temperatura de bulbo seco.

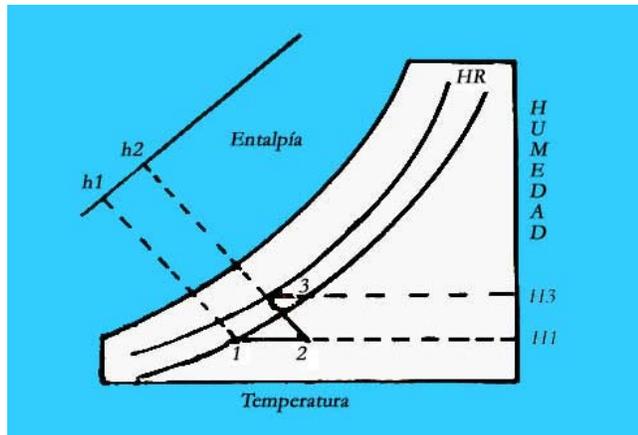
En la figura 1.16. se ha dibujado, sobre la silueta de una carta psicrométrica, el proceso de secamiento de granos en condiciones adiabáticas, es decir utilizando toda la disminución en calor sensible del aire para evaporar humedad del grano convirtiéndolo en calor latente (representado en el aumento del vapor asociado), sin ninguna pérdida de calor por radiación, convección o conducción.

Durante el secado adiabático, en consecuencia, la entalpía total y la temperatura de bulbo húmedo permanecen constantes, mientras la temperatura de bulbo seco disminuye y la presión de vapor, humedad (absoluta y relativa) y punto de rocío aumentan.



**Figura 1.16. El proceso de secado en una carta psicrométrica**

En la figura 1.17. dibujada sobre una carta psicrométrica, el punto N°1 representa aire ambiente con una temperatura de 20°C y una humedad relativa del 80%; el punto N°2 representa el mismo aire que ha sido calentado a 50°C; puede apreciarse que su humedad absoluta permanece constante y su humedad relativa disminuye.



**Figura 1.17. Calentamiento de aire y absorción de humedad durante el secado**

El secamiento por convección, analizado, puede realizarse únicamente, cuando la presión de vapor ejercida por el agua situada en la superficie de los granos, es mayor que la presión parcial del vapor en el aire circundante; la velocidad de secamiento será función de la diferencia de estas presiones, del coeficiente de transferencia de masa y del área expuesta del grano.

El coeficiente de transferencia de masa es análogo al de transferencia de calor. Ambos coeficientes son medidas de resistencia al flujo por unidad de área, el primero al paso de masa (agua) y el segundo de calor, a través de la fina película de aire estancado que rodea los granos y dependen de la velocidad del aire circundante que modifica el espesor de la película.

La presión de vapor de los granos varía con su humedad y temperatura. Los granos húmedos presentan en su superficie una presión de vapor

aproximadamente igual a la del agua líquida libre. Cuando se va removiendo la humedad por secamiento y la superficie no se encuentra totalmente húmeda, la presión de vapor va disminuyendo en forma acelerada.

➤ **Calor Consumido** La cantidad total de calor que consume un proceso de secado de granos incluye, además de calor latente utilizado en la evaporación, calor para recalentar el vapor del aire, para compensar las pérdidas por radiación, para calentar el producto y el agua que contenga, para calentar el aire y el vapor que contenga y el calor adicional que se requiere para promover la difusión de la humedad de los granos hasta su superficie.

➤ **Calor Latente**

$$Q_l = hfg * W * \Delta H \quad (1.7.)$$

Donde **W** es la cantidad de producto a secar y **ΔH** es la humedad removida por Kilogramo de producto.

➤ **Calor de Recalentamiento**

$$Q_r = (0.45) * T * \Delta H * W \quad (1.8.)$$

➤ **Calor de Radiación** Depende del material de construcción y características de la secadora, régimen de vientos circundantes, etc.

➤ **Calor para calentar el producto**

$$Q_p = W(C_p + C_a * HF)\Delta T \quad (1.9.)$$

Donde **W** es la cantidad de producto que se calienta,  $C_p$  es el calor específico de la sustancia,  $C_a$  es el calor específico del agua ( $C_a = 1$ ), **Hf** es la humedad final del producto en base seca, y por último  $\Delta T$  es la variación de temperatura del producto.

➤ **Calor para calentar el aire**

$$Q_a = W_a(C_a + C_v * Habs)\Delta T \quad (1.10.)$$

Donde **W<sub>a</sub>** es el flujo de aire en Kilogramos, **C<sub>a</sub>** es el calor específico del aire ( $C_a = 0.24$ ), **C<sub>v</sub>** es el calor específico del vapor ( $C_v = 0.45$ ), **Habs** es la humedad absoluta y por último **T** es la variación de temperatura del aire.

La cantidad de calor para evaporar en granos húmedos, es ligeramente mayor que la necesaria para evaporar agua libre, pero aumenta en los granos más secos, especialmente si han sido sometidos a un proceso de secado largo y se encuentran francamente en la fase de velocidad de secado decreciente, en el cual la velocidad está controlada por la velocidad interna de difusión de la humedad, y sino por la capacidad desecante del aire.

➤ **Eficiencia Térmica** La relación entre la cantidad de calor efectivamente utilizada para evaporación (convertida en calor latente), y la cantidad total de calor utilizada, se define como eficiencia térmica. En equipos secadores de granos bien diseñados, se obtienen eficiencias de aproximadamente 60% a 65%.

El costo mundial del combustible, relativamente bajó hasta antes de la crisis de 1972 y la necesidad de disponer de secamiento de gran capacidad, hicieron que en el criterio de diseño de las secadoras, la capacidad tuviera mayor importancia que la calidad del grano y la eficiencia térmica. Sin embargo el precio actual de los combustibles ha obligado a los diseñadores a buscar medios para mejorar la eficiencia; se están utilizando sistemas que permiten recircular parte del aire de descarga de la maquina, el cual contiene aún una cantidad apreciable de calor sensible utilizable, para conseguir un mayor grado de saturación en el aire que se descarga finalmente.

Se están investigando otros sistemas, un poco más complicados, pero de alta eficiencia, como el “intercambiador de calor de tubos”, combinado con una “bomba de calor”. El intercambiador es un sistema cerrado de evaporación – condensación, formado por varias hileras de tubos capaces de transferir una alta cantidad de energía térmica; dentro de los tubos se coloca un fluido apropiado y una mecha de material capilar, de tal manera que se tenga dentro de ellos una circulación cerrada del liquido que se convierte en vapor y nuevamente en liquido.

En uno de los extremos del intercambiador se aplica aire caliente proveniente de la descarga de la secadora, vaporizando el líquido interno que se desplaza al otro extremo del dispositivo, extremo que no se encuentra sometido a la acción de aire caliente y del cual se puede remover la energía térmica, utilizando por ejemplo la corriente de aire frío que succiona el ventilador de la secadora; el enfriamiento produce la condensación del líquido que retorna al extremo caliente. La eficiencia del sistema depende de la diferencia de temperatura entre sus extremos.

Si el intercambiador se complementa con la bomba de calor, la recuperación de energía puede ser casi total. El calor recuperado por el intercambiador se utiliza para vaporizar líquido de refrigeración a baja presión, la producción de frío de uno de los extremos de la bomba permite ampliar la diferencia de temperatura en los extremos del intercambiador.

En otros experimentos se han utilizado grandes tubos construidos en polietileno negro, colocados en la succión de los ventiladores para captar calor del sol y disminuir las necesidades de combustibles.

## **2. SENSORES DE HUMEDAD EN GRANOS**

El contenido de humedad es una de las características más determinante para la calidad de los granos; su medición permite apreciar el estado de madurez de éstos después de realizada la respectiva recolección, sirve para decidir respecto al modo y el tiempo de secado antes de la trilla y por último, en la comercialización, permite conocer la cantidad de materia seca que se compra y establecer así el precio justo de venta.

Con el fin de realizar la respectiva medición y monitoreo del contenido de humedad, se ha optado emplear diversos métodos de determinación de humedad utilizando elementos sensores que se ajusten a las necesidades y características del proceso de secado.

### **2.1 SENSORES**

Los sensores son dispositivos que se encargan de medir magnitudes físicas y químicas y transformarlas en variables de fácil tratamiento para funciones

posteriores de control o supervisión. La magnitud física que suele ser empleada por los sensores como resultado es la tensión eléctrica.

Algunas de las características más importantes a tener en cuenta para la selección de los sensores son:

- Exactitud
- Precisión
- Rango
- Velocidad de respuesta
- Calibración
- Repetibilidad
- Costo
- Facilidad de funcionamiento

## **2.2 DEFINICION DE HUMEDAD**

La humedad, definida formalmente como la cantidad de vapor de agua presente en un gas o de agua impregnada o absorbida en un cuerpo, es una variable física de gran importancia en la industria. De hecho, existen muchos procesos y operaciones industriales que deben ser ejecutados bajo condiciones de humedades específicas y controladas.

En algunos casos, la consideración clave es la humedad contenida en el aire ambiental, mientras que en otros es la humedad contenida en el producto mismo. Sólo así puede garantizarse el éxito del proceso. Adicionalmente, la humedad afecta la calidad y costo de los productos. Por todas estas razones, la necesidad de disponer de sensores de humedad precisos y confiables adquiere cada vez más importancia.

Una de las industrias que requiere de la medición y control riguroso del contenido de humedad, es la industria arrocera, en la cual se debe monitorear constantemente el estado de dicha variable durante las distintas etapas del secado del grano.

Los granos están conformados en su estructura más simple por materia seca y agua. El contenido de agua de un producto se expresa en forma de porcentaje, es decir, que el porcentaje de humedad expresado se refiere a la proporción de humedad relacionada con el peso total del grano formado por la materia seca y el agua contenida en él.

### **2.3 DETERMINADORES DEL CONTENIDO DE HUMEDAD EN GRANOS**

Los humidímetros más utilizados, entregan resultados en base húmeda es decir, la cantidad de agua que tiene el grano en total (sobre su peso de materia seca mas agua). Éste es el dato que entregan los humidímetros más usados en el comercio.

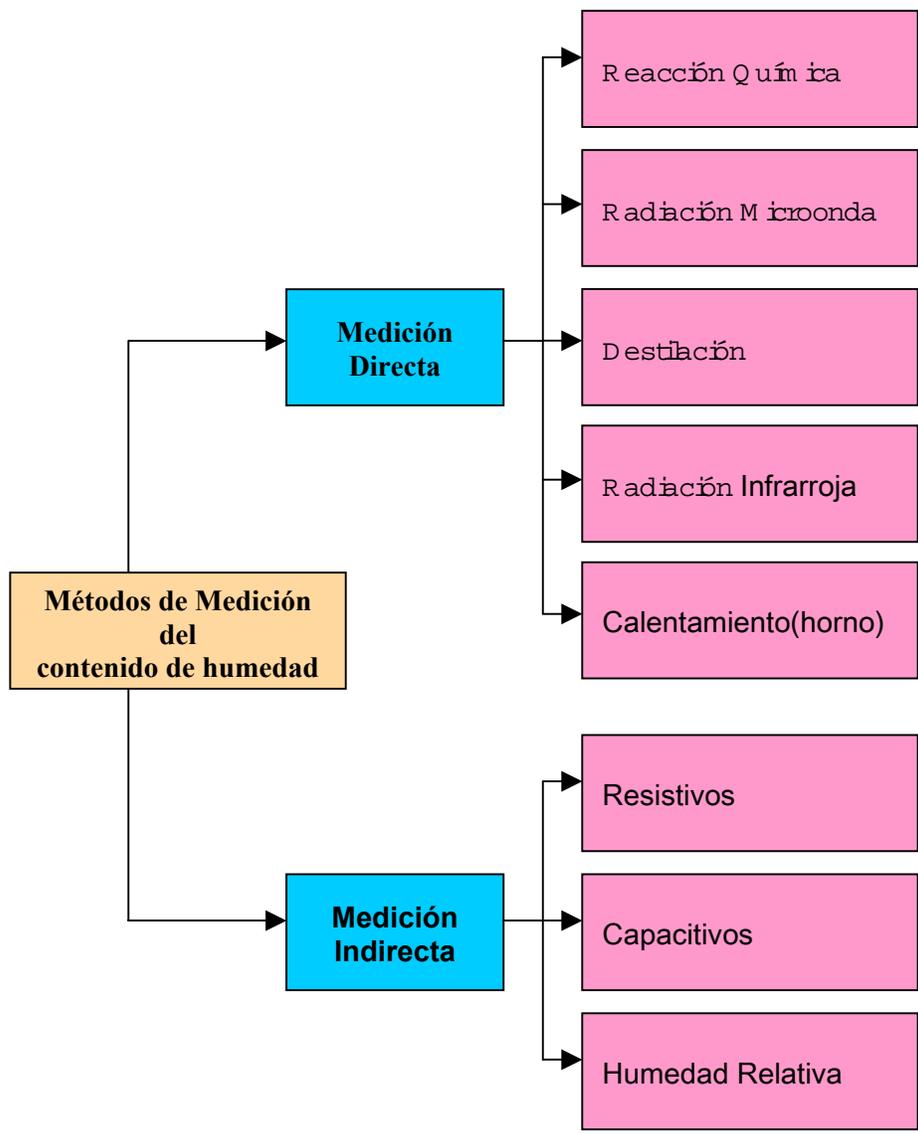
Existe una gran variedad de modelos y marcas de equipos medidores de humedad, de las más diversas procedencias; las cuales corresponden a los equipos más comúnmente utilizados en las industrias y centros de acopio en Colombia. Algunas de estas marcas y modelos son: Motomco modelo 919, el medidor UNIVERSAL, STEINLITE, BURROWS, GAC 2100 (actual medidor estándar de la USDA; Departamento de Agricultura de los Estados Unidos).

### **2.4 MÉTODOS DE MEDICIÓN DE HUMEDAD**

Actualmente, los equipos que se emplean para la determinación de la humedad de los granos se clasifican en medidores de lectura directa e indirecta. Los medidores de lectura indirecta miden generalmente características eléctricas del grano de arroz y luego mediante conversiones directas o por medio de tablas, se puede conocer el contenido de humedad.

Los medidores de lectura directa determinan el volumen de agua extrayendo la humedad. Por ejemplo, los métodos del horno evaporan la humedad del grano y determinan el volumen de agua por la pérdida de peso. Se considera que los métodos directos proporcionan una verdadera medida del volumen de humedad, por lo tanto son utilizados para calibrar los instrumentos basados en los métodos indirectos; los cuales son más prácticos y más rápidos al momento de realizar una medición.

Para transacciones comerciales, no resulta conveniente la utilización de medidores de lectura directa para la determinación de humedad, y se prefiere usar sistemas de mediciones rápidos, que proporcionan en poco tiempo resultados útiles y relativamente confiables. Los medidores por método directo igualmente son utilizados en pruebas de laboratorios donde se requieren datos muy precisos y donde el tiempo que se emplea en realizar la medición no es un factor primordial. Los distintos métodos para la medición de humedad del grano se pueden clasificar como se muestra en la figura 2.1.



**Figura 2.1. Clasificación de los métodos de medición de humedad para granos**

**2.4.1 Método de medición indirecta de humedad** La utilización de métodos directos de humedad como hornos exige demasiado tiempo (2-3 días) para conocer el contenido de humedad en una muestra, a causa de esto, en las operaciones comerciales normales se utilizan medidores de lectura indirecta, los cuales presentan mayor rapidez. Esta práctica ha generado resultados bastante

aproximados cuando la distribución de humedad dentro del grano es uniforme. Por el contrario, con granos recién cosechados en un día soleado, o recién secados en una máquina, en los cuales la distribución de humedad no es pareja, los resultados pueden ser erróneos por la tendencia de la mayoría de estos tipos de sensores a medir la humedad de la parte externa de los granos.

Los medidores de lectura indirecta más utilizados son aquellos que funcionan bajo el principio de operación de la variación de alguna característica o propiedad eléctrica en el grano.

De igual forma, se emplean sensores de medición de humedad relativa con el fin de determinar el contenido de humedad del grano, sin embargo las relaciones que hay que establecer entre dicha humedad relativa del aire que circunda el grano y el contenido de humedad propia del mismo son de gran complejidad y presentan numerosos factores que influyen en la determinación del valor correcto de humedad.

**2.4.1.1 Medidores eléctricos** Monitorear y detectar humedad es una tarea relativamente más compleja que medir otros parámetros físicos, como la temperatura, la presión o el flujo.

Los métodos eléctricos son los más usados en las operaciones de secado de granos y semillas. Son razonablemente precisos, extremadamente rápidos y sus resultados son reproducibles. Los métodos eléctricos para la medición de humedad de cereales son relativamente fáciles de mantener ajustados y de acuerdo entre sí.

Estos medidores utilizan las variaciones que sufren las características eléctricas de los granos al cambiar su contenido de humedad. El resultado de estos medidores se puede considerar bastante aproximado (exacto) cuando el grano tiene una distribución de humedad relativamente uniforme, debido a la tendencia a medir la humedad en la parte externa de los granos.

Al momento de realizar la medición de humedad del arroz con un medidor eléctrico, se presentan casos muy particulares cuando se está llevando a cabo el proceso de secado en cualquier tipo de sistema. En éste, el instrumento proporciona una medida inferior a la medida de humedad real del grano de arroz.

La causa principal del hecho anterior, se le atribuye a la forma en que se lleva a cabo el proceso de evaporación del grano, donde inicialmente la superficie externa del grano se calienta más que la interna, manifestando una mayor evaporación, y por tanto su contenido de humedad será en esa misma medida

menor que la parte interna. Sin embargo este valor aumentará cuando se equilibre la humedad interna y externa del grano.

Teniendo en cuenta que este tipo de sensores miden la humedad de la parte externa de los granos; el valor obtenido inicialmente será inferior al que se obtendrá cierto tiempo después de esta primera medida. Este hecho se produce por no poseer la respectiva corrección por temperatura.

A causa de éste inconveniente, se ha optado por esperar un tiempo prudente después que se extrae el arroz de su proceso de secado y reposarlo para luego realizarle la respectiva medida real de humedad del grano.

Otras desventajas de los medidores eléctricos son el requerimiento periódico de calibración, el rango de medición relativamente reducido y la necesidad de corriente eléctrica.

Existen dos tipos de medidores eléctricos:

- Medidores Resistivos
- Medidores Capacitivos

➤ **Medidores resistivos** Los medidores resistivos se basan en la propiedad que presentan ciertos materiales (aislados entre sí) de cambiar su resistividad de

acuerdo a su contenido de humedad. En general, un aumento de la humedad del grano implica un descenso brusco de la resistividad y viceversa.

Estos dispositivos requieren medir una muestra (cuyo peso o volumen es fijo) que es necesario comprimir hasta un espesor determinado, con el fin de obtener resultados consistentes, teniendo en cuenta que la resistencia eléctrica disminuye al aumentar la presión.

Comúnmente estos tipos de sensores poseen electrodos que son los encargados de ser insertados dentro de la muestra de arroz. Estos electrodos dependerán en su forma, disposición y cantidad de acuerdo a las condiciones del grano. La resistencia del grano se mide entre las dos placas o entre los electrodos. Uno de los problemas con este tipo de medición es la dificultad de mantener la calibración, por el uso de muchos elementos mecánicos, los cuales cambian el espacio entre los electrodos y consecuentemente proporcionan un valor más bajo del contenido de humedad. Sin embargo este problema se puede solucionar con un mantenimiento periódico del instrumento.

La relación entre el contenido de humedad y la resistencia se indica en la siguiente ecuación:

$$\log p = -am + c \quad (2.1)$$

ó

$$bm = \log(\log 1/p) \quad (2.2)$$

Donde:

**a, b y c** son constantes

**m** es el contenido de humedad

**p** es la resistencia

La presión que ejercen los electrodos sobre la muestra varía la resistencia de la misma y por tanto afectan la precisión del método.

Los valores por encima del 17% de humedad presentan una relación parabólica entre el contenido de humedad y el logaritmo de la resistencia eléctrica. La mayoría de los medidores no proporcionan lecturas por debajo del 7% de humedad, debido a que existen muy pocos cambios en la conductividad eléctrica.

Debido a que la tendencia de este tipo de medidor es detectar la humedad por la medida de la resistencia en la superficie del grano, aquellas muestras de granos que se han secado recientemente con aire caliente proporcionan lecturas mas bajas del verdadero y actual contenido de humedad.

Las características de los medidores de humedad de tipo resistivos son:

- El circuito es simple, económico y fácil para manejar.

- La densidad de la muestra no afecta en gran cantidad la determinación de humedad.
- La temperatura afecta la determinación de humedad.
- Existe la tendencia a indicar el contenido de humedad en la parte superior de los electrodos.
- Los valores de humedad relativamente bajo son difíciles de medir.

➤ **Electrodos Resistivos** Los electrodos son los elementos que se encuentran en contacto directo con la muestra a medir.

La construcción y disposición de los electrodos dependerá de factores como el rango de humedad que se desea medir, cantidad de la muestra, arquitectura de la planta. Algunos de los diseños más usados para electrodos en granos de arroz son:

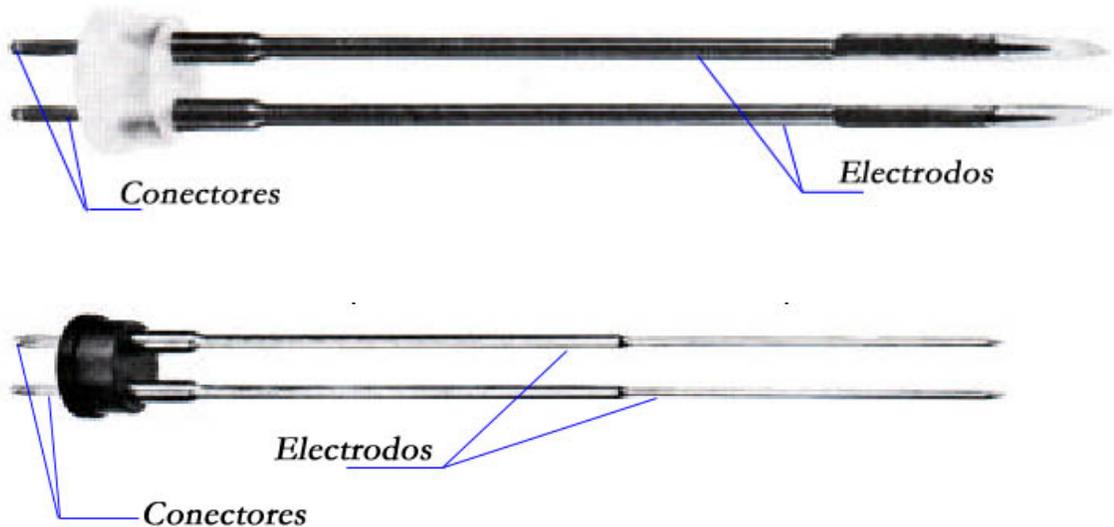
- **Electrodo de Copa**



**Figura 2.2. Electrodo de Copa**

Este electrodo está constituido esencialmente por una prensa y un recipiente cilíndrico, en el cual se coloca el grano de arroz. La utilización de la prensa tiene como propósito mantener una presión constante en las muestras de arroz que se están analizando y de esta forma, obtener condiciones homogéneas para proporcionar una medida precisa. Este electrodo se conecta directamente al medidor.

- **Electrodos de Puntas**



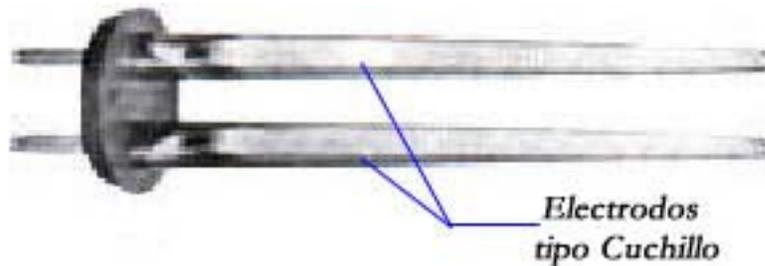
**Figura 2.3. Electrodos de Puntas**

Este tipo de electrodo consta de dos puntas, las cuales son llevadas e introducidas en las muestras de grano de arroz que se desean analizar, obsérvese que la longitud de los electrodos variará de acuerdo a la profundidad de la capa de arroz.

Estos electrodos tienen como desventaja no garantizar la homogenización de la muestra a analizar, debido a que no presentan una presión mínima constante en todos los puntos, con el fin que la medición sea precisa. Por otro lado, ofrece como ventaja la mayor facilidad al momento de tomar la medida sin necesidad de trasladar la muestra a un recipiente especial, brindando la posibilidad de tomar las mediciones on-line con el proceso de secado de arroz.

Adicionalmente, debido a la forma que poseen los electrodos, este diseño se puede utilizar para la medición de humedad en granos de arroz que se encuentren depositados en sacos o bolsas, lo cual es imposible de realizar con otros tipos de electrodos.

- **Electrodos tipo Cuchillo**

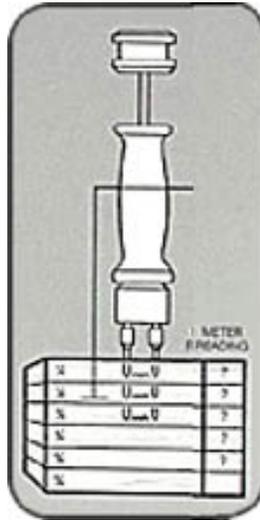


**Figura 2.4. Electrodos tipo Cuchillo**

A través de este tipo de electrodo se busca cubrir una mayor cantidad de granos con el mismo número de electrodos (dos electrodos), pretendiendo tener una medida promedio más acertada al valor real.

La característica más importante de los medidores tipo resistivos con electrodos aislados (tipo puntas y tipo cuchillo), radica en que el valor de humedad medido solo corresponde al punto donde el electrodo se ha sumergido y a una línea o porción de material (grano de arroz) no aislada entre los electrodos.

➤ **Características de los electrodos Resistivos**

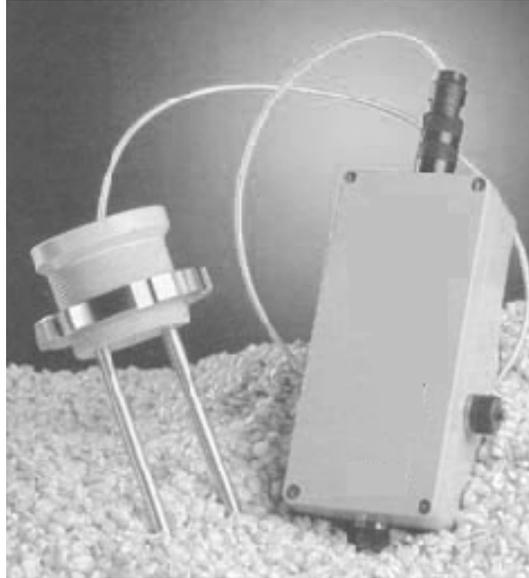


**Figura 2.5 Empleo de electrodos resistivos en capas de granos de arroz**

De acuerdo a la disposición de la capa de arroz en las albercas de secado, los porcentajes de humedad variarán conforme se alejen de la fuente de aire caliente.

Generalmente, los sensores de humedad de tipo resistivos constan además de los electrodos, de una etapa electrónica para el acondicionamiento, procesamiento y en algunos casos, la visualización del valor correspondiente de humedad desde el mismo dispositivo o a través de un computador.

➤ **Medidor resistivo comercial**



**Figura 2.6. Medidor Resistivo**

Algunos medidores resistivos de humedad comerciales son el medidor Trigger y el medidor Universal. Otros medidores se presentan en los anexos.

➤ **Medidores capacitivos** Los medidores de capacitancia miden la constante dieléctrica de los granos, la cual variará dependiendo del contenido de humedad de éstos.

La medición de humedad en medidores capacitivos requiere que la muestra se haga pasar o se deposite en una celda (cilíndrica generalmente) cuyas paredes son las placas de un condensador activadas por una corriente de alta frecuencia.

Se debe llenar la celda o conducto cilíndrico de medición siempre en la misma forma, por lo que se realiza el respectivo pesaje de la muestra para conseguir lecturas que proporcionen siempre resultados similares.

Adicionalmente, se requiere de correcciones precisas para temperaturas diferentes a los 77°F con el objeto de obtener medidas exactas

Los límites de medición de los medidores de capacitancia podrían considerarse más amplios que el rango de los medidores resistivos; proporcionando de esta forma, valores de humedad más exactos cuando la humedad en el grano de arroz varía entre un límite inferior de 6% y un límite superior entre 26% y 29%; haciéndolos más prácticos. Los medidores capacitivos están menos sujetos a errores que son causados por la mala distribución de la humedad entre granos o dentro de un mismo grano.

Una de las grandes desventajas es mantener los medidores por capacitancia regulados, así como mantener la precisión entre varios medidores entre sí. En general, la precisión de un detector de humedad de este tipo es de 0.5% dentro de un límite de humedad reducido, cuando se están analizando muestras de granos limpias.

Entre estos dispositivos usados comercialmente encontramos con mayor frecuencia las marcas correspondientes a MOTOMCO, STEINLITE, BURROWS, entre otros.

La difusión de los medidores capacitivos, es en la actualidad mayor que los medidores resistivos debido a su mayor precisión con granos los cuales han sido secados artificialmente.

➤ **Electrodos para medidores de humedad de tipo capacitivo** Existen electrodos especialmente diseñados para la medida del contenido de humedad, basándose en el principio de funcionamiento de la capacitancia eléctrica. Los electrodos de humedad de este tipo están compuestos por un electrodo alimentado con un alto voltaje y varios electrodos que simulan la tierra eléctrica. El electrodo que se alimenta con un voltaje, se aísla o se protege electrostáticamente en su base para asegurar una alta exactitud en la medición de humedad.

Se han propuesto varios métodos para la medida del contenido de humedad de materiales granulares. Entre los métodos usados existe un método el que mide la capacitancia electrostática de la muestra para determinar el contenido de agua. En este método los electrodos de medición; que se conectan en paralelo con un circuito de resonancia, se introducen en una muestra para la medición de la

capacitancia electrostática entre los electrodos mediante el cambio de la capacitancia en el circuito de resonancia.

La capacitancia electrostática de la muestra es proporcional, siendo éste último posible de determinar mediante la medición de la capacitancia en el circuito de resonancia.

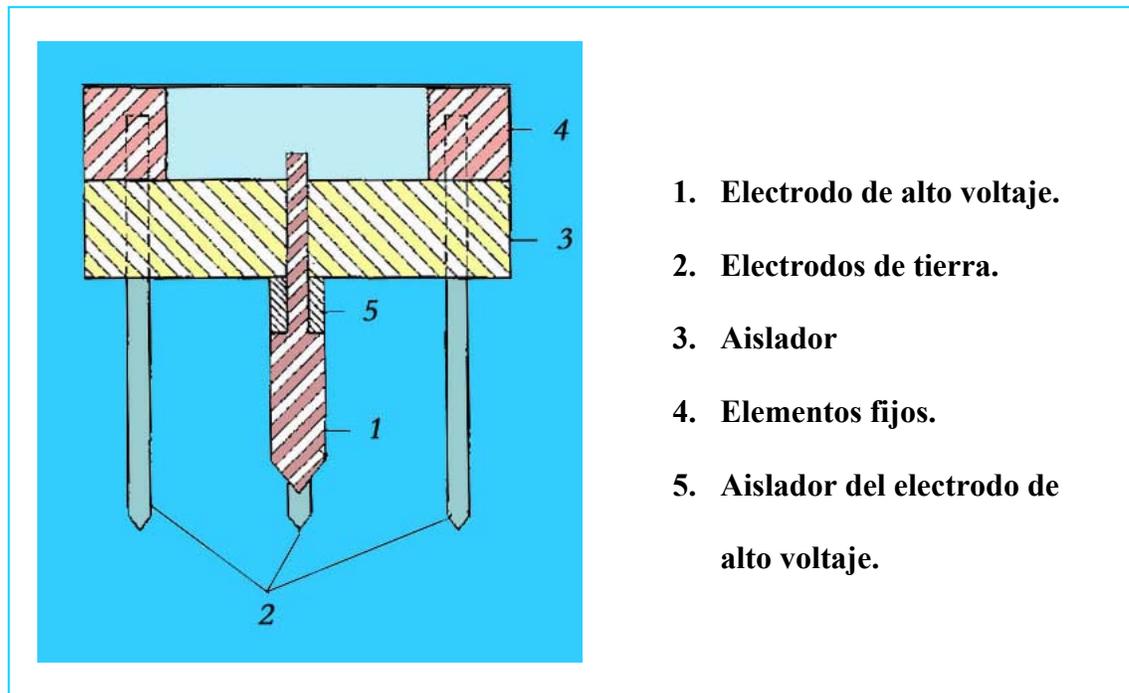
Para un medidor de humedad de este tipo, los electrodos convencionales presentan ciertos inconvenientes. Primero que todo, si los electrodos no se insertan por completo en la muestra (porque la superficie de la muestra no se encuentra nivelada o por cualquier otra razón) la medida resultaría más baja que el verdadero valor del contenido de humedad.

Como segunda medida, en el caso donde el corrimiento de la compensación se realiza después de la medición del contenido de humedad actual, si algo de la muestra queda en la base del electrodo, el corrimiento de la compensación será inexacto, debido a que el efecto de la muestra restante incrementara la capacitancia electrostática de los electrodos.

Por último, el efecto de las pérdidas de capacitancia en la medición no es insignificante al momento de proporcionar el valor del contenido de humedad.

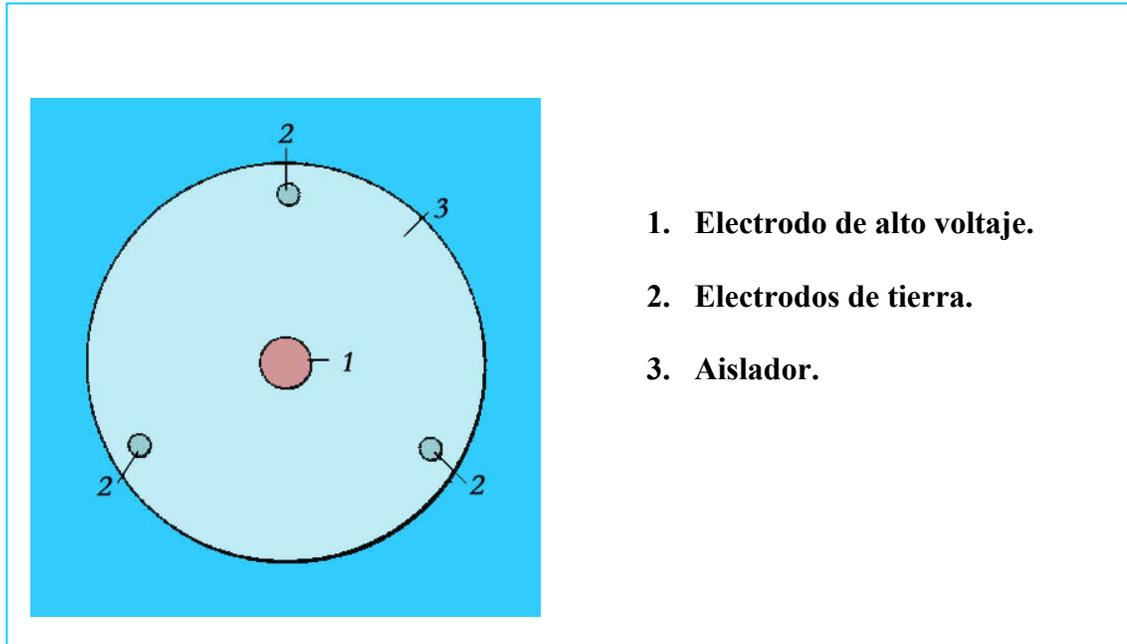
Con el fin de eliminar los tres problemas antes mencionados y asegurar una buena exactitud en la medición de este tipo de medidores que operan bajo el principio de capacitancia, se requiere de una construcción especial de electrodos.

➤ **Descripción de los electrodos capacitivos** La figura 2.7. es una vista de la sección vertical de un prototipo de electrodos capacitivos que incluye los distintos elementos básicos y su correspondiente disposición dentro del arreglo de electrodos.



**Figura 2.7. Sección vertical del prototipo 1 de electrodos**

La figura 2.8 es una vista superior del mismo prototipo de electrodo capacitivo.



**Figura 2.8. Vista superior del prototipo 1 de electrodos**

En las figuras 2.7. y 2.8. se muestra un prototipo de electrodos capacitivos, el cual se compone de un electrodo de alto voltaje, tres electrodos de tierra que están dispuestos físicamente alrededor del electrodo de alto voltaje y eléctricamente en paralelo con el mismo, y un aislador que se encarga de mantener estas dos clases de electrodos en su posición, de manera que la capacitancia no se vea afectada por la variación de la distancia entre los electrodos, sino solo por la humedad presente en la muestra contenida entre ellos. De igual forma, se encuentra un elemento fijo para los electrodos de tierra y un aislador, el cual se coloca en la base del electrodo de alto voltaje.

Preferiblemente este aislador ubicado en la base del electrodo de alto voltaje tiene una constante dieléctrica relativamente baja con respecto al aislador fijo de los electrodos de tierra.

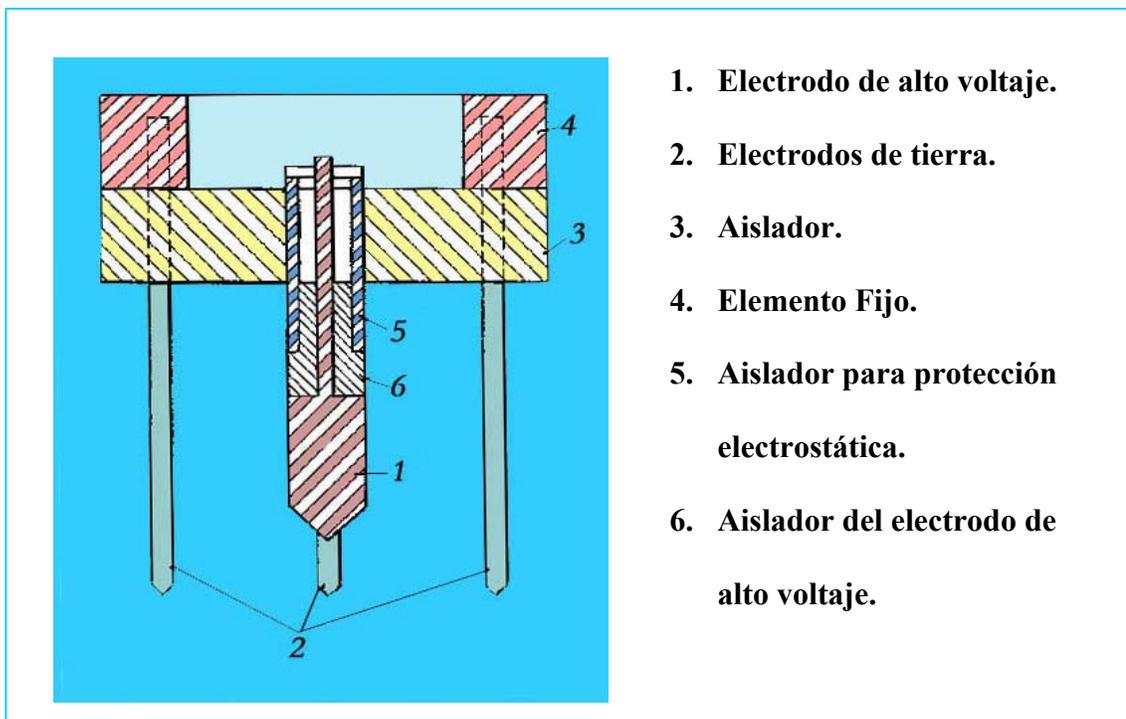
Los tres electrodos de tierra tienen mayor longitud que el electrodo de alto voltaje, con el fin de minimizar el efecto de la pérdida de capacitancia.

Como resultado de este arreglo, la capacitancia electrostática entre el aislador ubicado en la base del electrodo de alto voltaje y los tres electrodos de tierra con la muestra localizada entre ellos, es considerablemente más pequeña que la que ocurre entre el electrodo de alto voltaje y los electrodos de tierra, esta relación es más notable en este tipo de electrodo que en los electrodos convencionales; en los cuales, teniendo una misma cantidad de muestra presente entre los electrodos, se obtiene una mayor incidencia del valor de capacitancia entre el aislador y los electrodos de tierra.

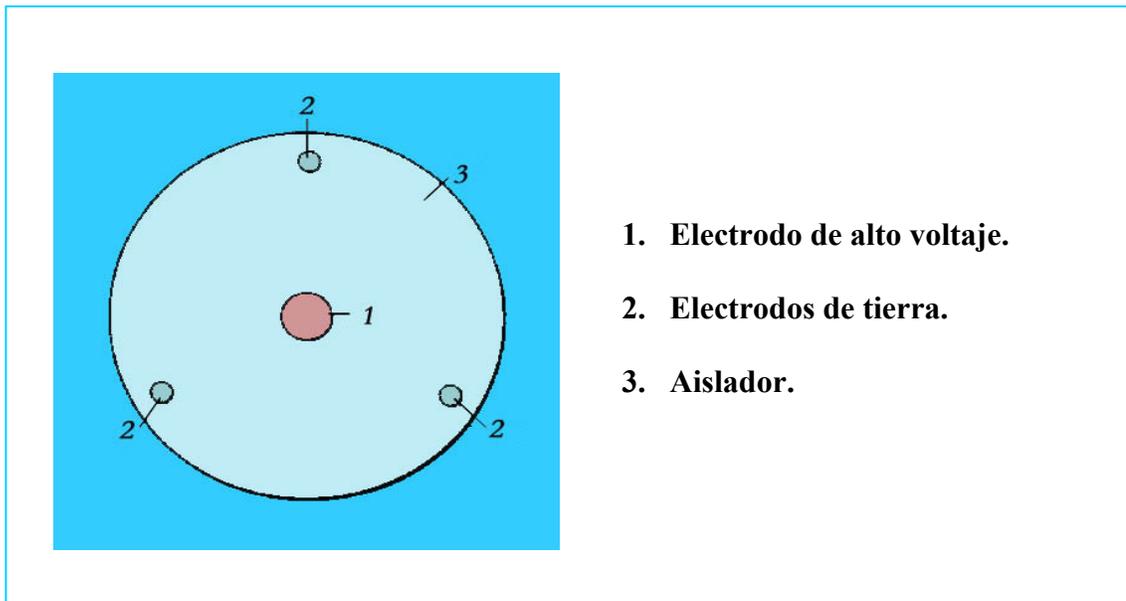
Aún si los electrodos de las figuras 2.7. y 2.8. no están completamente introducidos y la muestra no alcanza la base de los electrodos, el efecto de desviación de dicha situación será más pequeño que con el electrodo convencional, tanto como si se insertara hasta el punto donde el electrodo de alto voltaje esté completamente introducido en la muestra. Igualmente, cualquier efecto de desviación producido por alguna cantidad de muestra restante en el

aislador de la base del electrodo de alto voltaje es muchísimo menor que con el electrodo de tipo convencional, lo que aumenta la exactitud del instrumento.

La figura 2.9. y 2.10. ilustra a través de una vista de la sección vertical otra forma de construcción de electrodos muy parecida a la anterior en sus partes y disposición de las mismas.



**Figura 2.9. Sección vertical del prototipo 2 de electrodos**



**Figura 2.10. Vista superior del prototipo 2 de electrodos**

Como se puede observar, en este diseño se cuenta con un componente aislador adicional que se coloca en la base del electrodo de alto voltaje y además, se emplea una protección electrostática colocada sobre dicho aislador, de manera que se extienda a través del aislador que se rotuló con el número 3 en la figura 2.9.

Esta disposición asegura que la muestra que se encuentre presente entre la protección electrostática adicionada y los electrodos de tierra, no causen un incremento apreciable en la capacitancia electrostática entre el electrodo de alto voltaje y dichos electrodos de tierra. Como consecuencia, en este diseño

cualquier defecto de desviación producido por la inserción incompleta del electrodo dentro de la muestra y por la muestra adherida a la base de los electrodos, es aun mucho más pequeño que la del electrodo convencional.

En general, ambos diseños aseguran una medida estable y exacta del contenido de humedad para largos periodos de tiempo de una muestra. Adicionalmente, otra ventaja de su estructura y diseño radica en la dispersión de capacitancia, la cual se puede minimizar debido a que el electrodo de alto voltaje es más pequeño que los electrodos de tierra.

De acuerdo a la necesidad de monitoreo que se requiera y a otro tipo de necesidades, es posible realizar algunas variaciones a estos tipos de electrodos; como es el caso de utilizar no solo un electrodo si no varios electrodos de alto voltaje. En este caso, se pueden esperar los efectos descritos con anterioridad, utilizando igualmente un aislador o una protección electrostática en la base de cada electrodo de alto voltaje como se mencionó anteriormente.

➤ **Medidor capacitivo comercial (Motomco 919)**



**Figura 2.11. Motomco 919**

Este medidor es muy popular ya que ha sido aprobado por las diferentes entidades colombianas; este dispositivo fue por mucho tiempo el medidor estándar en los manuales del USDA (departamento de agricultura de USA); aunque recientemente se sustituyó por el medidor GAC 2100.

El Motomco es un aparato de tipo capacitivo que brinda excelentes resultados especialmente en granos secos, de manera que éstos son bastante seguros para tomar las decisiones de almacenaje. Desafortunadamente, la precisión de su lectura es baja cuando mide la humedad de granos bastante húmedos.

Además de las consideraciones anteriores, debe tenerse en cuenta que las tablas de interpretación de humedad de aparatos como el Motomco, son modificadas

todos los años, por los fabricantes, para ajustarlas a las condiciones promedias de las cosechas promedios en ese año, teniendo en cuenta que las variaciones de lecturas de dos cosechas pueden llegar a ser de un 1%, o más.

### **3. OTROS MEDIDORES DEL CONTENIDO DE HUMEDAD DEL GRANO**

Existen otros tipos de medidores para la determinación del contenido de humedad, los cuales brindan ventajas solo en aplicaciones específicas y que son muy poco usadas en la industria arrocera colombiana. Sin embargo es importante conocer sus principios básicos de funcionamiento así como algunas de sus ventajas y desventajas frente a los medidores más difundidos en Colombia y estudiados en el capítulo anterior.

#### **3.1 MEDIDORES INDIRECTOS**

Entre los medidores de humedad indirectos se encuentran los medidores resistivos, capacitivos de humedad relativa entre otros. Los medidores de humedad resistivos y capacitivos, fueron explicados en el capítulo anterior. En este capítulo, hablaremos acerca de los medidores de humedad relativa y adicionalmente de los medidores por radiofrecuencia y microonda cuando utilizan la variación de las propiedades dieléctricas del grano.

**3.1.1 Medidores de humedad relativa (HR)** La humedad relativa, es la razón entre el contenido efectivo de vapor en la atmósfera y la cantidad de vapor que saturaría el aire a la misma temperatura y presión.

La humedad relativa presenta una relación inversa con la temperatura, debido a esto, si la temperatura atmosférica aumenta, la humedad relativa disminuye. Una caída de la temperatura incrementa la humedad relativa produciendo a su vez rocío. La humedad relativa se expresa normalmente como un porcentaje.

Existen diversos tipos de medidores de humedad relativa para aplicaciones en las cuales se requiere medir el contenido de humedad del grano. Este tipo de medidores determina la humedad relativa (HR) en el aire que rodea el grano. La humedad relativa en el aire que rodea una muestra de grano depende del contenido de humedad del mismo.

Para este tipo de medición se requiere una corrección por temperatura, y la exactitud de la medida dependerá principalmente de la distribución uniforme de la muestra. Por consiguiente, se necesita de una a dos horas de tiempo para que se establezca la humedad de equilibrio, con el fin que las medidas arrojen un resultado confiable.

Generalmente, la medida de cantidad de humedad en el aire se realiza mediante una de los siguientes métodos:

- Se puede extraer agua de una muestra y pesarla o detectarla de alguna forma.

Uno de los métodos que emplea esta técnica es el método **Gravimétrico**, el cual es el más preciso y se utiliza como referencia para calibrar otros equipos.

- Otra medida es a través del **Punto de Rocío**, el cual es la temperatura a la que el vapor de agua se condensa y se deposita sobre una superficie sólida. Este sistema sin embargo, no es muy exacto en mediciones donde el aire contiene demasiada cantidad de polvo, como sucede con frecuencia en el secado de granos.

- Otro medio común de medida de la humedad relativa es el **Psicómetro**, su construcción está basada en dos transductores, uno húmedo y otro seco. El aire debe pasar por el transductor húmedo haciendo que el agua se evapore. Usualmente para este tipo de medidores se necesitan tablas de conversión para estimar la humedad relativa.

- Se puede medir alguna propiedad del agua para estimar que cantidad de agua hay en la muestra. Algunas de estas propiedades del agua más utilizadas son la conductividad, la constante dieléctrica y absorción de microondas, infrarrojo o

ultravioleta, las cuales se pueden analizar mediante una variación efectuada en otro material. Este principio se utiliza en el higrómetro de precisión.

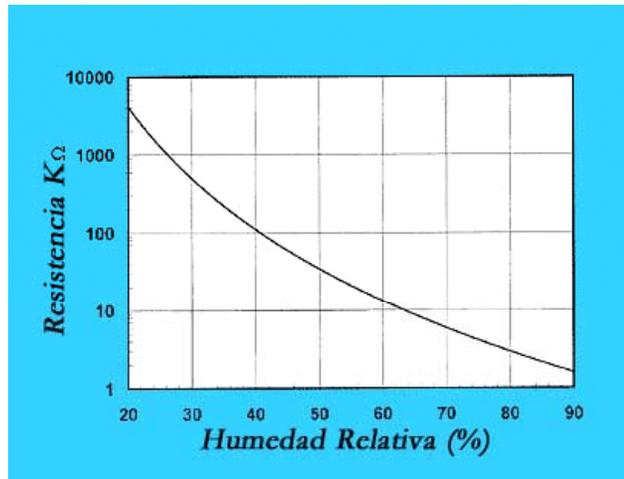
Estos dispositivos están formados por un material cuyas propiedades cambian cuando absorbe humedad. Entre los dispositivos, más comunes encontramos los higrómetros de impedancia.

**3.1.1.1 Sensores de humedad relativa resistivos** Estos sensores miden el cambio en la impedancia eléctrica de un material Higroscópico tales como un polímero conductor, sal o un sustrato debidamente tratado.



**Figura 3.1. Sensores resistivos de humedad relativa**

El cambio de impedancia está determinado típicamente por una relación exponencial inversa a la humedad. Figura 3.2.



**Figura 3.2. Relación HR contra resistencia**

Los sensores generalmente están compuestos por electrodos de metal noble que se depositan en un sustrato por técnicas fotoresistivas. El sustrato se cubre con un polímero conductor. El sensor absorbe el vapor de agua y se disocian los grupos funcionales iónicos, dando como resultado un incremento de la conductividad eléctrica.

El tiempo de respuesta para la mayoría de los sensores resistivos está dentro del rango de 10 a 30 segundos para un cambio del 63%. El rango de impedancia típico de los elementos resistivos varía desde  $1K\Omega$  hasta  $1M\Omega$ . La mayoría de los sensores resistivos utilizan un voltaje de excitación AC simétrico sin ningún nivel DC para prevenir la polarización del sensor.

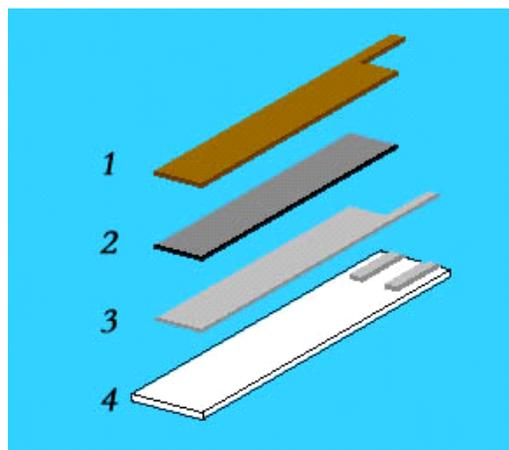
Un inconveniente de algunos de los sensores resistivos es su tendencia a dar valores errados cuando se exponen a la condensación. El pequeño tamaño, bajo

costo, su intercambiabilidad y su estabilidad a largo plazo, hacen que este tipo de sensor de humedad relativa sea utilizado en aplicaciones de control y monitoreo de productos, industrias y el comercio.

Las últimas tendencias de sensores de humedad relativas que se están desarrollando utilizan un recubrimiento cerámico con el fin de superar las limitaciones en ambientes donde ocurren condensaciones.

Entre los distintos modelos de sensores resistivos de humedad relativa encontramos los sensores constituidos por cuatro capas:

- Capa conductiva porosa
- Capa activa Higroscópica
- Capa conductiva
- Sustrato cerámico



**Figura 3.3. Capas del sensor resistivo de HR**

El principio de operación de estos sensores depende del grado de absorción del vapor de agua entre las dos capas conductoras y la capa activa higroscópica construida sobre una base de sustrato cerámico.

Con este tipo de diseños es posible trabajar en ambientes de  $-40^{\circ}\text{C}$  a  $60^{\circ}\text{C}$  con rangos de operación de  $-120^{\circ}\text{C}$  a  $20^{\circ}\text{C}$  de punto de rocío y una exactitud de  $\pm 1^{\circ}\text{C}$ .



**Figura 3.4. Sensor Resistivo de HR**

En forma general la ecuación de la Humedad Relativa en términos de temperatura e impedancia se expresa de la siguiente manera:

$$\%HR = A\{(CZ)^{[(T + 459.7)/D(T + 459.7) + B]}\} \quad (3.1.)$$

Donde:

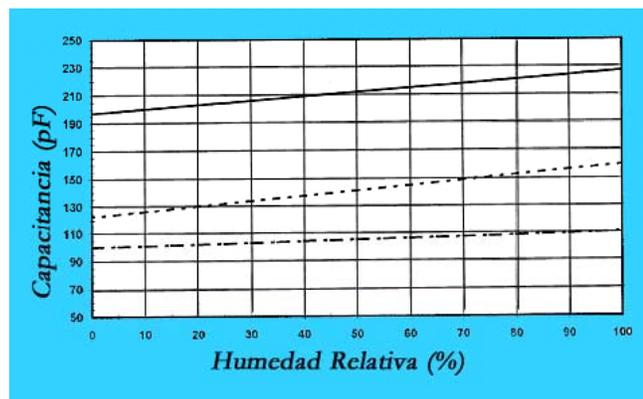
**A, B, C y D** son constantes relacionadas con los rangos específicos.

**Z** es la impedancia propia del sensor en Mega ohmios y **T** es la temperatura en grados Fahrenheit.

**3.1.1.2 Sensores de humedad relativa capacitivos** Este tipo de sensores consisten de un sustrato sobre el cual se deposita; entre dos electrodos conductores, una lámina delgada de polímero o de oxido de metal. La superficie del sensor se cubre con un electrodo metálico poroso para proteger dicho sensor de la contaminación y la exposición a la condensación.

El incremento en la constante dieléctrica de un sensor capacitivo de humedad es casi directamente proporcional a la humedad relativa del ambiente que lo rodea.

Los sensores capacitivos se caracterizan por tener un bajo coeficiente de temperatura, habilidad para operar a altas temperaturas (hasta 200°C), completa protección contra la condensación y una resistencia razonable para los vapores químicos. Los rangos de tiempo de respuesta se encuentra entre 30 y 60 segundos para un cambio de 63% de humedad relativa. En la figura 3.5. se muestra la relación existente entre la humedad relativa, y el valor de capacitancia.



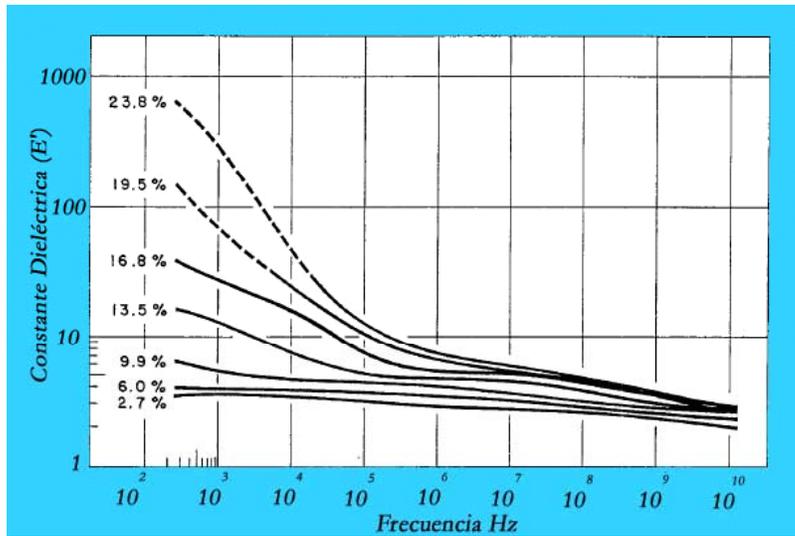
**Figura 3.5. Capacitancia contra HR (%)**

**3.1.2 Medidores de humedad de radiofrecuencia en granos** Este método de medición de humedad se basa en las propiedades eléctricas que presentan los granos, el uso de la radiofrecuencia, de las propiedades dieléctricas, de la permisividad del grano para correlacionarlo con su contenido. de humedad.

Las propiedades dieléctricas se representan comúnmente por una expresión compleja de la permisividad relativa o de la constante dieléctrica.

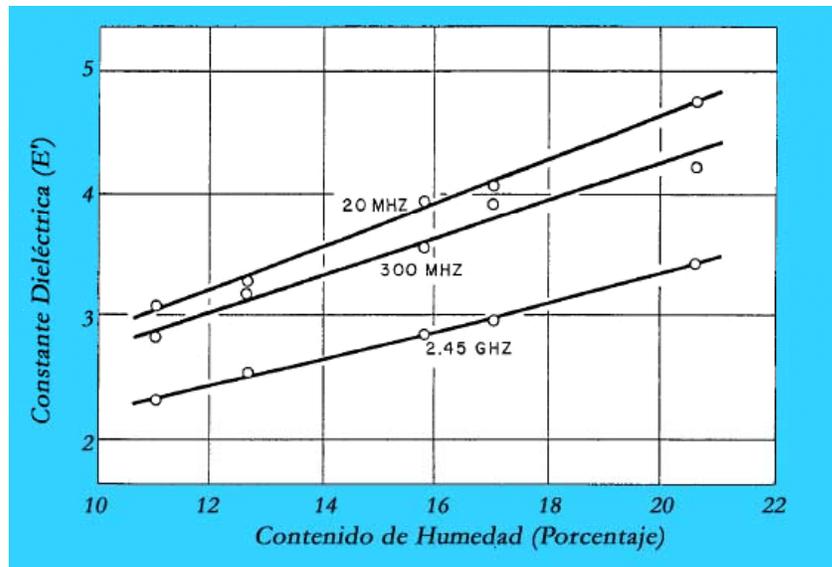
$$\varepsilon = \varepsilon' - j\varepsilon'' \quad (3.2.)$$

Donde  $\varepsilon'$  es la constante dieléctrica y  $\varepsilon''$  es el factor de pérdida dieléctrica. Los valores de permisividad comúnmente dependen de la frecuencia y la temperatura así como de la estructura y de la composición química de los materiales. En el grano, y otros materiales higroscópicos, tanto  $\varepsilon'$  como  $\varepsilon''$  están bastante correlacionadas con el contenido de humedad, y esta correlación se ha demostrado para amplios rangos de frecuencia.



**Figura 3.6. Frecuencia Vs constante dieléctrica**

La dependencia de la permisividad dieléctrica del arroz con el contenido de humedad se muestra en la figura 3.7.



**Figura 3.7. Contenido de humedad Vs constante dieléctrica**

Donde se puede observar una relación lineal entre dicha constante dieléctrica y el contenido de humedad del arroz. Las propiedades dieléctricas de los granos y otros materiales en particular también son función del valor de densidad que posean.

Para la medición dinámica o también denominada monitoreo del contenido de humedad del grano en movimiento, es mucho más difícil determinar la corrección por densidad de la muestra.

Debido a que las constantes del grano mantienen una relación con el contenido de humedad, muchos de los medidores de humedad electrónicos de radiofrecuencia se han diseñados con una placa paralela o una línea coaxial que mantiene la muestra, para el cual la capacitancia cambia cuando una muestra de grano se ubica dentro del recipiente. El cambio en la capacitancia está directamente asociado con la constante dieléctrica del grano, y por consiguiente puede proporcionar el valor del contenido de humedad. La mayoría de estos medidores de humedad de tipo dieléctrico utilizan frecuencias en el rango comprendido entre 1 y 20MHz.

Estos medidores de humedad utilizan una corrección por temperatura y por variaciones en la densidad o también denominada prueba de peso del grano. Algunos instrumentos sensan la temperatura y el peso de la muestra del grano y

automáticamente corrigen la lectura de humedad para dichas variables, proporcionando valores de humedad satisfactorios para su uso práctico.

En frecuencias del rango de las microondas, se han utilizado las medidas de la atenuación y del corrimiento de fase obtenidas de la medición de la transmisión. Para una onda plana de incidencia normal atravesando una capa de material con baja pérdida se pueden obtener los componentes de la permisividad compleja relativa como se muestra a continuación:

$$\varepsilon' \approx \left( 1 + \frac{\Phi \lambda_0}{360t} \right)^2 \quad (3.3.)$$

$$\varepsilon'' \approx \frac{A \lambda_0 \sqrt{\varepsilon'}}{8,686\pi t} \quad (3.4.)$$

Donde:

$\lambda_0$  es la longitud de onda en el espacio libre.

$\Phi$  es el desfase en grados.

$A$  es la atenuación en dB experimentado por la onda al atravesar la capa de espesor  $t$ .

Por lo tanto, además de la frecuencia utilizada (que determina  $\lambda_0$  y la capa del grano de espesor  $t$ ), se requiere de los valores de medida de atenuación y desfase, para caracterizar la permisividad del material.

Tanto  $A$  y  $\Phi$  se establecieron para ser relativamente lineales con el contenido de humedad  $M$  en mediciones experimentales con diferentes tipos de granos. Cuando estos parámetros se normalizan para una densidad del grano  $\rho$  y se divide por la capa.

El método de medición de humedad por radiofrecuencias presenta como principales ventajas su rapidez, no es destructivo y puede ser una alternativa para el método con microondas, por tener un costo mucho menor que éste.

**3.1.3 Medidores de humedad por microondas** Con este tipo de medición se determina el contenido de humedad del grano midiendo la transmisión de una onda de alta frecuencia que atraviesa la capa de grano. Esta onda es emitida desde un transmisor localizado en uno de los lados de la muestra. La señal de microonda transmitida se detecta mediante un receptor localizado al otro lado de la muestra. El efecto que causa el grano sobre la señal de microonda se utiliza para determinar el contenido de humedad.

Este es otro método que utiliza las características eléctricas del grano, en cuyo caso corresponde a las propiedades dieléctricas del mismo para monitoreo y sensado instantáneo de su contenido de humedad. Así como esta propiedad dieléctrica se correlaciona con el contenido de humedad, ésta igualmente se encuentra afectada por el peso o también denominada densidad del grano. Este

método a diferencia del método por radio frecuencia, puede determinar el contenido de humedad independientemente de las variaciones de densidad.

En general, las ventajas que presenta este método son:

- Debido a su principio de funcionamiento, es aplicable a procesos donde se desee monitorear el contenido de humedad del grano que esta en movimiento o que se transporta a través de bandas.
- Resultados en tiempo real.
- Medición continúa del contenido de humedad en procesos dinámicos.
- Puede ser adaptado para una medición en línea por control remoto, por ser un método no intrusivo y no destructivo,
- La radiación de las microondas no es afectada por las condiciones ambientales, por lo tanto el polvo, el vapor del agua, la temperatura y la presión no afectan las lecturas.
- Permite obtener medidas en grandes volúmenes de grano, proporcionando valores bastante representativos.

### **3.2 MEDIDORES DIRECTOS DE HUMEDAD**

Otros métodos aún utilizados para la determinación del contenido de humedad que se basan principalmente en la extracción del líquido o contenido de agua en la muestra de grano son:

**3.2.1 Reacción química** Consiste principalmente en extraer químicamente el agua contenida en el grano. Este método depende de la reacción del yodo con el agua en presencia de dióxido de sulfuro, pero es muy poco común emplearlo debido a su gran costo y a que su tiempo de respuesta es bastante considerable.

**3.2.2 Método de destilación** Sus resultados son proporcionados en un tiempo considerable; entre 10 ó 20 minutos. Son lo suficientemente preciso para calibrar aparatos medidores de lectura indirecta (medidores de humedad relativa, medidores eléctricos). Para realizar una medición se sumerge el grano en aceite calentado a más de 100°C, de tal manera que se produzca una rápida evaporación de la humedad. Un sistema de destilación permite condensar y recolectar el agua evaporada en una probeta graduada y calcular fácilmente el contenido de humedad.

**3.2.3 Hornos de vacío** Este método de medición directa de humedad utiliza un vacío parcial para conseguir evaporación rápida con temperaturas relativamente bajas. El proceso de evaporación se lleva a cabo bajo una temperatura de aproximadamente 266°F. Finalmente, se determina el contenido de humedad del grano mediante la resta del peso de la muestra después de llevado a cabo el secado con la muestra antes de secarla.

El método de horno es especialmente útil en productos sensibles al calor, aunque contengan cantidades apreciables de aceites volátiles.

**3.2.4 Radiación por microonda e infrarrojo** A diferencia del método indirecto explicado con anterioridad, en este caso la radiación de ondas infrarrojas y microondas son empleadas con el fin de evaporar el agua contenida en la muestra de grano.

### **3.3 PATENTES DE MEDIDORES DE HUMEDAD PARA GRANOS**

La importancia de conocer el contenido de humedad de algunos materiales granulares ha generado gran interés por parte de ciertos grupos de investigadores, proporcionando distintos modelos de medidores de humedad basado en alguno de los métodos antes descritos, incluyendo algunas variaciones para la mejora en las características como exactitud, facilidad de calibración, repetibilidad, entre otras.

Algunas de las patentes que han tenido mayor difusión en el sector agrícola colombiano se describirán a continuación.

**3.3.1 Medidor de humedad para granos<sup>1</sup>** Este medidor está compuesto por un armazón o carcasa, una cavidad cilíndrica (delimitada por el armazón), un recipiente para medición (dispuesto dentro del espacio o cavidad cilíndrica) para alojar el grano que será medido, y una báscula de pesaje para detectar el peso del grano que se ha depositado dentro del recipiente de medición.

El recipiente de medición del medidor de humedad es un capacitor cuya impedancia es proporcional al contenido de humedad y a la cantidad de grano que contiene. Éste es sostenido por dos resortes al armazón del medidor de humedad que están unidos a la parte tubular de la balanza y al armazón. La balanza o báscula de pesaje comprime un capacitor de medición, el cual una parte está unida o fijada al armazón del medidor de humedad, mientras la otra parte se fija a la balanza.

Esta balanza igualmente comprime una porción tubular construida de un material aislante que se encuentra en la parte central de la base del recipiente de medición.

---

<sup>1</sup> Fuente: "Patente N° PCT/F184/00046", Markku Inkinnen, Hanuu Jokkinen , Mikko Kuopanportti, Wilska Matti

El capacitor de medición se encargara de medir el movimiento del recipiente de medida, y teniendo en cuenta dicho movimiento, se obtendrá el peso del grano que se ha depositado dentro del recipiente.

Este diseño se basa en el método capacitivo de medición de humedad, donde el contenido de humedad altera la constante dieléctrica y consecuentemente la capacitancia.

Para realizar la medición se requiere utilizar siempre muestras homogéneas, con el fin de aumentar la exactitud de la cifra del contenido de humedad del grano que arrojará el medidor, presentándose mayor dificultad al momento de realizar mediciones en campo. Este aspecto se puede solucionar mediante la medición del peso o del volumen de las muestras o a través del sometimiento de la muestra contra los electrodos de medición a una presión constante.

Después de haber depositado la cantidad correcta de grano dentro del recipiente de medida, el peso de la muestra cierra un interruptor que hace actuar un circuito de medición digital.

Este instrumento no se ve afectado por factores del entorno tales como la temperatura del grano o la temperatura del mismo medidor, ya que cuenta con un

elemento sensor de temperatura que se encuentra en la base del recipiente de medición, con el fin de realizar la corrección por temperatura.

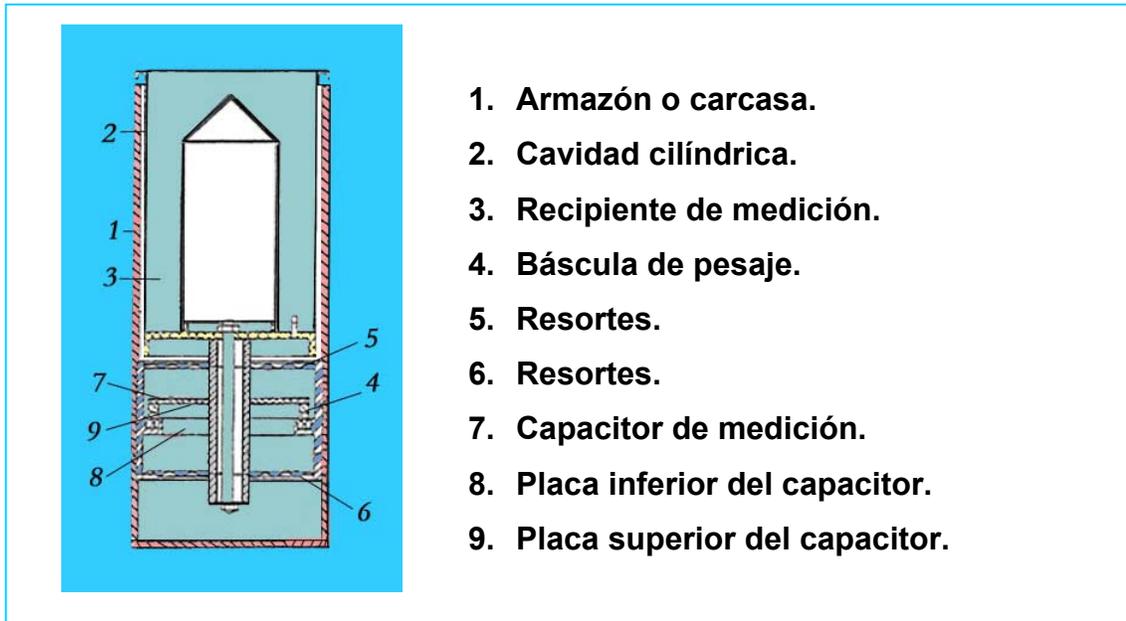


Figura 3.8. Medidor de humedad para granos

### 3.3.2 Medidor eléctrico de humedad<sup>2</sup>

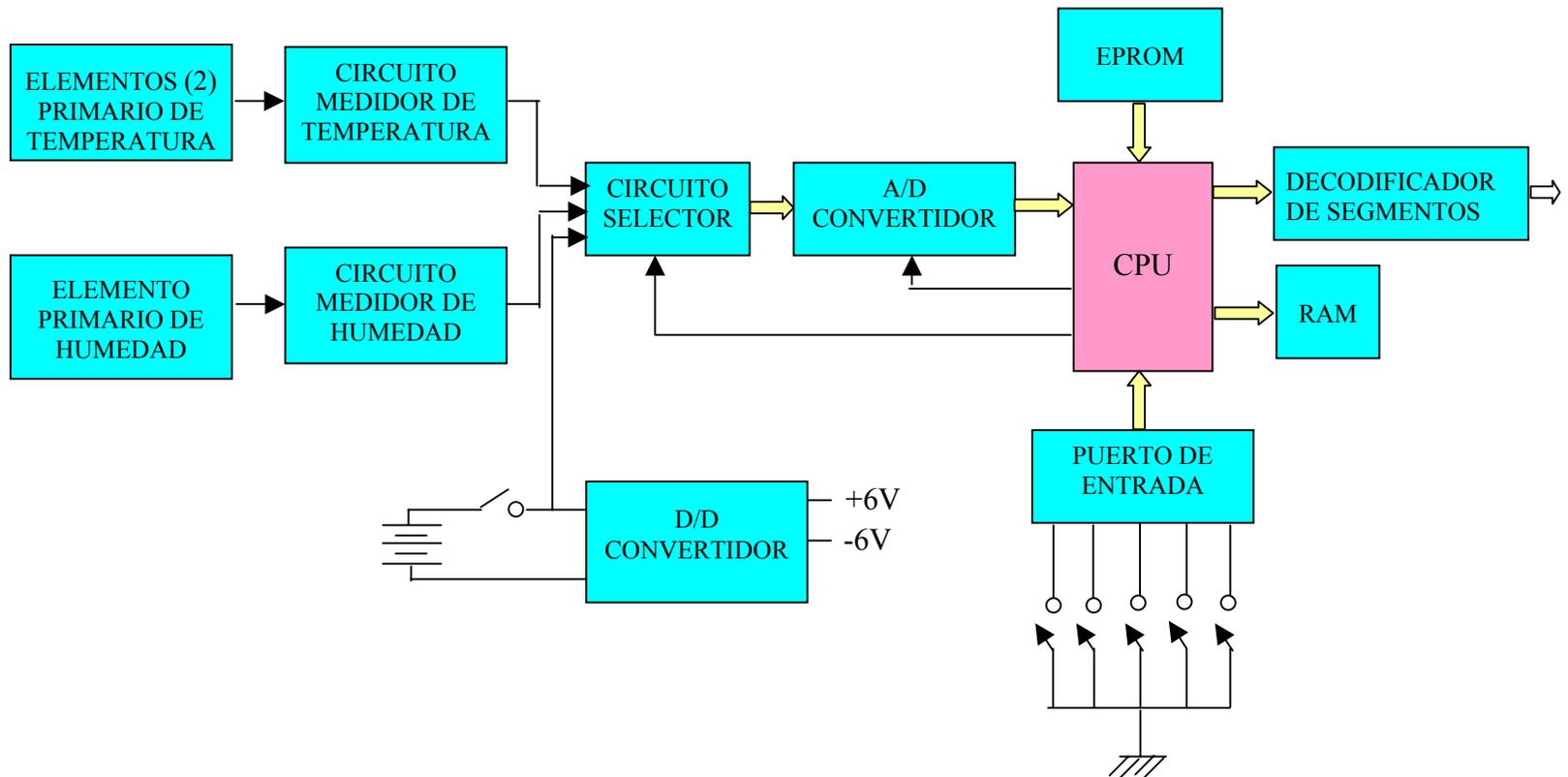
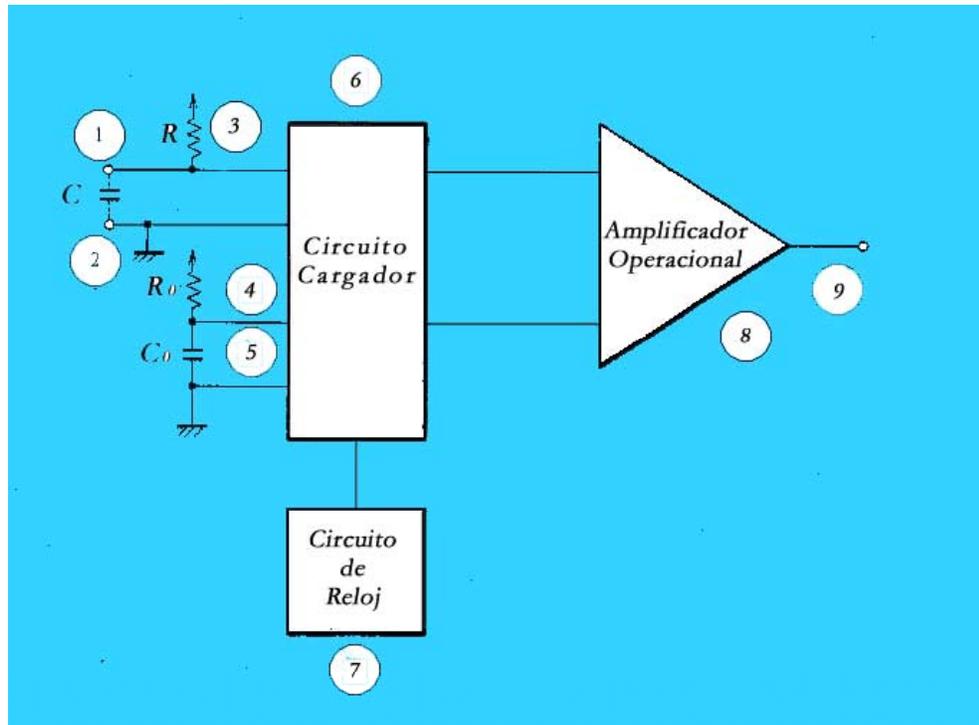


Figura 3.9. Diagrama general para un medidor de humedad eléctrico tipo capacitivo

<sup>2</sup> Fuente: "Patente N° 4'621.228", Kawasaki Kuni Toki, Osamu Sindou

Este medidor es un dispositivo que opera bajo el principio de medición de la capacitancia eléctrica de una muestra que se encuentra entre un electrodo positivo y otro negativo. El valor del contenido de humedad variará con base a la correlación existente entre el contenido de humedad y las características eléctricas del material (cereal, granos). Este cambio de capacitancia es producido en el circuito de medición de humedad y se puede ver reflejado en un cambio o variación de una señal de voltaje DC, luego por medio de un circuito selector conmutable se aplica dicho voltaje a un convertidor análogo/digital. La señal ya convertida a un valor de tipo digital se aplica a una Unidad Central de Procesamiento que controla la operación del convertidor análogo/digital.

En este dispositivo se utiliza una memoria programable de solo lectura borrable para almacenar en ella los parámetros, condiciones de calibración y cálculos relacionados con varios tipos de muestras. Así mismo, se puede realizar la compensación por temperatura mediante la programación de nuevas condiciones de operación y cómputo en la memoria, y el uso de termómetros resistivos cuyas señales son amplificadas a través de un circuito medidor de temperatura.



**Figura 3.10. Circuito de medición de humedad**

En la figura 3.10. se muestra un circuito medidor de humedad. En éste se puede apreciar que se conectan dos cargadores de voltaje constante ( $C$ - $R$  y  $C_0$ - $R_0$ ) al cargador (6), y respectivamente se carga de cero voltios a cierto nivel de voltaje durante un ciclo de la salida del reloj dada por el circuito de reloj (7).

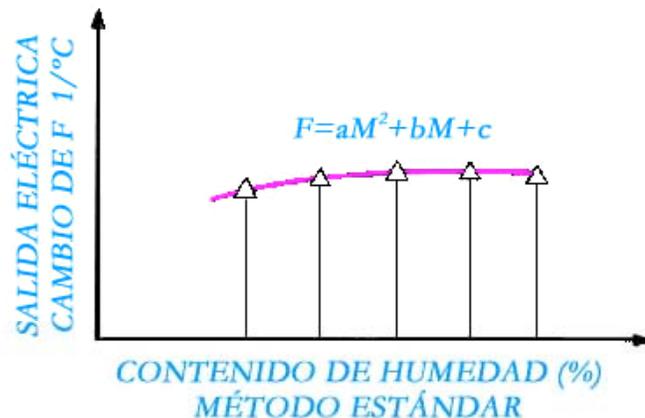
El voltaje resultante se aplica a un amplificador operacional (8), de tal manera que la salida de voltaje es proporcional a la diferencia entre los dos voltajes producidos en la línea (9) y se aplica luego al circuito selector de la figura 3.10. Se obtienen los valores de voltajes del nodo que unen los elementos  $C$  y  $R$  (3) con base en los voltajes del nodo que unen  $C_0$  (5) y  $R_0$  (4). Se determinan, el

período del reloj, las constantes tanto de los resistores como de los capacitores, de manera que este voltaje sea significativamente más bajo que la fuente de voltaje para cargarlo. La magnitud de la salida del amplificador operacional equivale al valor del contenido de humedad del grano.

La salida eléctrica por cada cambio de grado centígrado (F) presenta una relación cuadrática:

$$F = aM^2 + bM + c \quad (3.5.)$$

Donde M es el contenido de humedad medido sin tener en cuenta la corrección por temperatura. A continuación se muestra gráficamente esta relación.



**Figura 3.11. Gráfica de Voltaje con compensación de temperatura contra contenido de humedad**

La compensación por temperatura L, se basa en la medida de temperatura de 30°C, y se usa para la corrección del valor digital de humedad D mediante:

$$L = (T - 30)F \quad (3.6.)$$

$$X = D - L \quad (3.7.)$$

Donde D es el valor digital del contenido de humedad.

El valor de salida deseado del contenido de humedad  $Y$  se determina por medio de la ecuación por el uso de los parámetros para el cálculo del supuesto valor de humedad.

$$Y = AX^2 - BX + C \quad (3.8.)$$

El valor resultante de humedad  $Y$  depende del valor previamente calculado si corrección por temperatura (M).

**3.3.2 Medidor de humedad del grano<sup>3</sup>** El medidor permite medir la humedad del grano y adicionalmente medir la temperatura a la cual se encuentra la muestra.

Este medidor consta de un recipiente que cuenta con una parte externa o caparazón y un elemento central aislado de dicha parte externa, donde se deposita la muestra. Emplean igualmente un oscilador conectado a la carcasa

---

<sup>3</sup> Fuente: "Patente N° 4'462.250", Jhon A. Stuart

externa del recipiente y encargado de generar un pulso que pasa a través del grano y a través de un electrodo central, para luego amplificar dicha señal (mediante un amplificador conectado al electrodo central) y alimentar de esta manera un medidor que permite visualizar y leer el contenido de humedad. De la misma forma, se emplea un termistor con su respectivo circuito con el fin de ajustar la medida de humedad de acuerdo a la variación de temperatura.

El detector de humedad requiere del uso de tablas o gráficas, para identificar cada punto de la escala, proporcionando una determinación exacta del contenido de humedad.

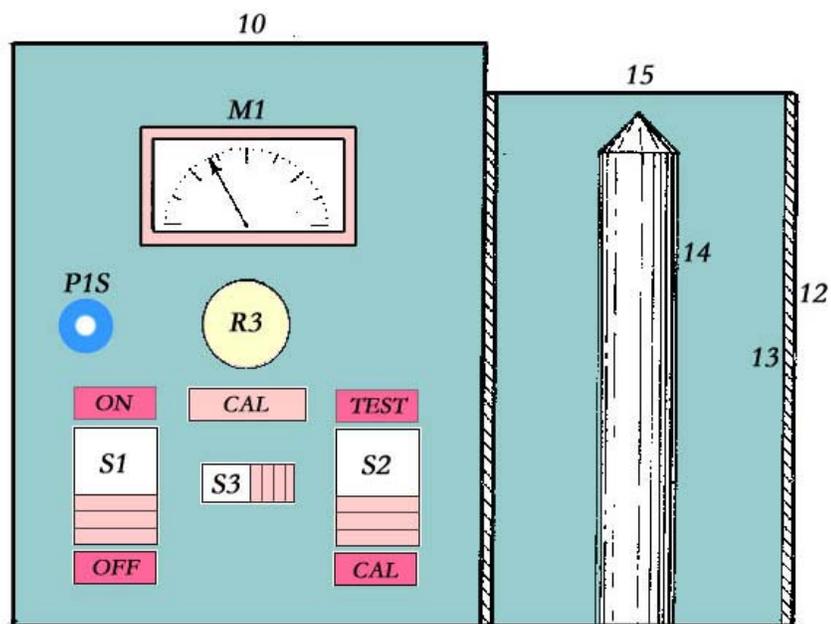


Figura 3.12. Esquema del medidor del contenido de humedad en granos

La figura 3.12. es un esquema parcial del medidor mostrando en ella la sección frontal, la celda donde se introduce el grano, el caparazón o parte externa. Todo esto se muestra como una unidad integral.

## **4. DESCRIPCIÓN DEL PROTOTIPO CONSTRUIDO**

El objetivo principal de esta monografía consiste en diseñar y construir un prototipo de monitoreo de humedad en el proceso de secado de arroz, con el fin de obtener un método más exacto y preciso en la medida de humedad, al igual que proporcionar una investigación especializada en los distintos tipos de métodos eléctricos de medición del contenido de humedad para el grano de arroz durante el proceso de secado.

### **4.1 DESCRIPCIÓN DEL PROTOTIPO**

Las principales características que en general debe poseer todo el sistema son la simulación del funcionamiento de secado de arroz en albercas, obtención de los valores de humedad mediante un método indirecto y la calibración a través de un medidor patrón reconocido por la USDA (Motomco 919).

El prototipo a construir debe constar de una planta piloto que simule el proceso de secado de arroz, un medidor formado por un elemento sensor que se constituye de varios electrodos y por una etapa de medición o determinación del contenido de humedad.

La planta debe funcionar en rangos de temperaturas típicas a las del proceso real (45°C - 60°C), de manera que se generen cambios de humedad característicos del proceso. El sensor por su parte, debe detectar on-line dichos cambios que se presenten durante el secado del arroz y proporcionar una salida eléctrica.

La planta debe contar con un sistema, el cual permita que el aire del ambiente se caliente y a su vez el flujo de aire logre atravesar la capa de arroz que se desea secar, removiendo de esta manera, la humedad sin que el grano se eleve.

Por su parte, el sensor debe contar con electrodos que estén en contacto directo con la muestra del grano al cual se le desea conocer el contenido de humedad y ejercer una presión constante sobre dicha muestra, para proporcionar una medición exacta y precisa de la humedad. Se contará con dos tipos distintos de electrodos que se diferenciarán por el material utilizado, correspondiente tanto a electrodos de bronce y acero inoxidable.

Con el fin que el sensor sea fácil y práctico de trasladar a través de cualquier parte de la alberca para la toma de mediciones de humedad, los electrodos se han diseñado de manera que sean livianos, de relativamente pequeñas dimensiones, y que se ajusten a la profundidad de la capa de arroz que está depositada en la planta. Igualmente, el sensor contiene una etapa de medición y calibración de poca longitud y peso relativamente bajo.

Con el propósito de obtener una óptima calibración y operabilidad el sensor, debe contar con una cantidad de elementos que permitan al usuario mantener calibrado en todo momento el sensor para proporcionar medidas correctas.

Por último, se desean realizar y analizar la relación corriente contra el contenido de humedad del arroz propia del sensor y calibrarlo con un medidor patrón aprobado por la USDA (Motomco 919), utilizado en la industria arrocera para la medición de humedad, con el fin que los valores entregados por el sensor sean confiables. Así mismo, se realizarán las correspondientes tablas que relacionan la resistividad del grano, de acuerdo a su contenido de humedad para cada uno de los electrodos.

Teniendo en cuenta las características que debe poseer el proyecto, a continuación se muestra un diagrama esquemático que ilustra la forma como está constituida la planta piloto para el proceso de secado de arroz, y el sensor del contenido de humedad.

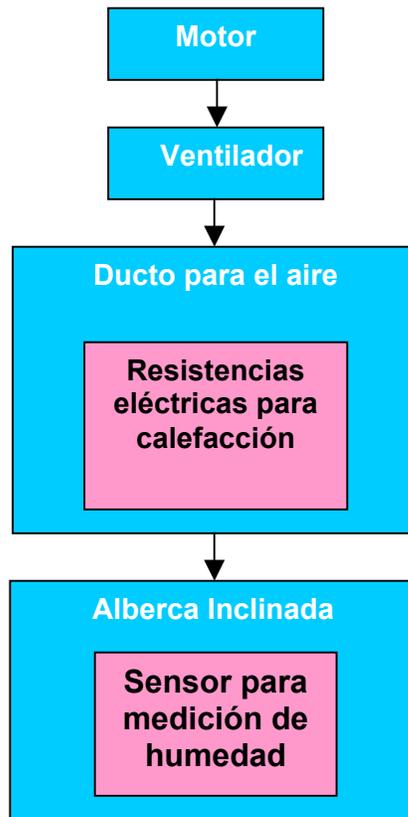


Figura 4.1. Diagrama general de los componentes de la planta piloto

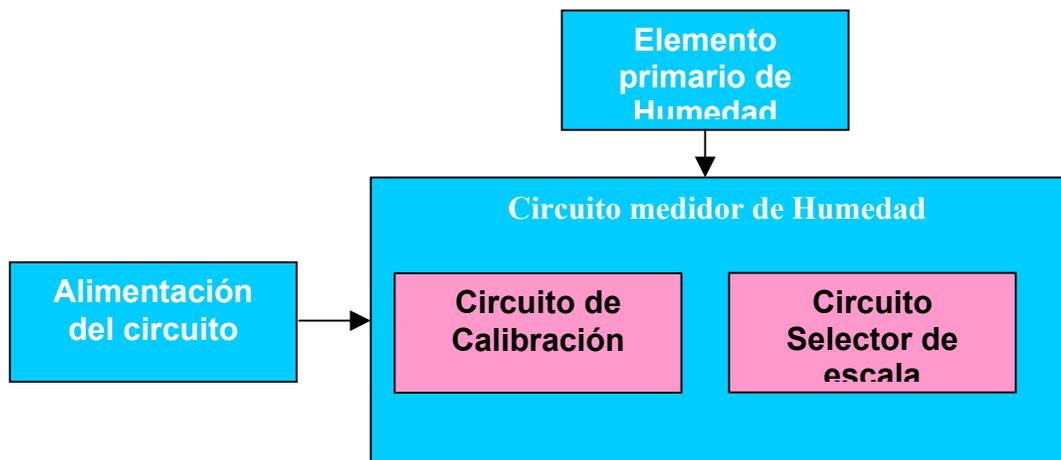


Figura 4.2. Diagrama general de los componentes del sensor

## 4.2 ESPECIFICACIONES DE LA PLANTA PILOTO

La planta piloto simula el proceso de secado de arroz por medio del sistema de secado en albercas con aire caliente, debido principalmente a que este sistema es el más difundido por las industrias arroceras en Colombia, para el secado del arroz. De igual forma, se tuvo en cuenta mantener la forma o estructura física de la alberca utilizada en los procesos reales y principalmente mantener una relación de 1:5 en la profundidad de la capa de arroz.

En general, los equipos empleados para el funcionamiento de la planta piloto son:

- Motor
- Ventilador
- Resistencias eléctricas
- Alberca

**4.2.1 Motor** El motor es el componente que transforma la energía eléctrica que lo alimenta (220V AC) a energía mecánica, proporcionando el movimiento necesario y el sentido de giro correcto al ventilador que se encuentra acoplado al eje del mismo.

El motor utilizado es un motor de inducción bifásico que presenta las siguientes características técnicas:

**Alimentación:** 220V AC.

**Potencia:** 60 Watts.

**Frecuencia de operación:** 60Hz.

**R.P.M:** 1040

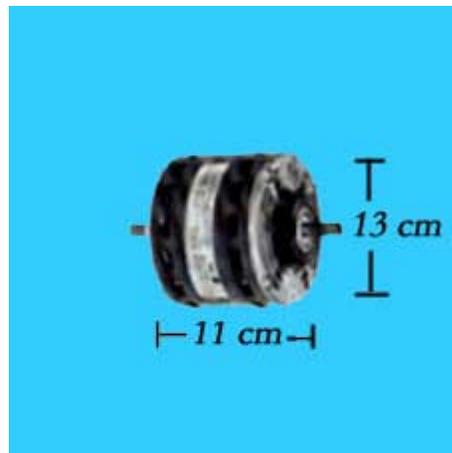
El circuito de conexión del motor se completa a través de un capacitor de  $30 \mu\text{F}$  a 380 V. ubicado en serie con el devanado auxiliar del motor, de manera que se proporcione un campo magnético rotacional uniforme del estator y el motor se comporte como si estuviera arrancando conectado a una fuente de potencia trifásica.

Las características físicas que presenta el motor son:

**Peso:** 10 Kg

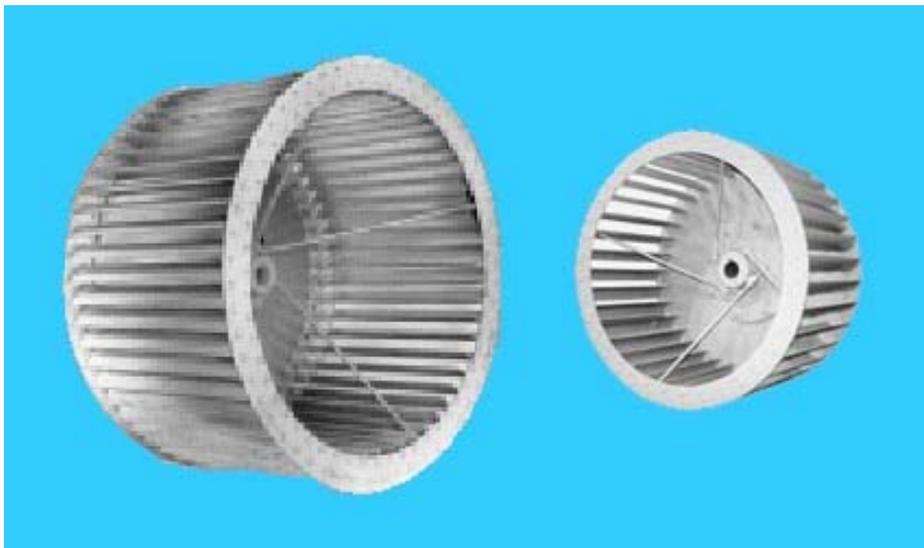
**Diámetro:** 13 cm

**Largo:** 11 cm



**Figura 4.3. Motor de Inducción**

**4.2.2 Ventilador** El ventilador es el equipo encargado de proporcionar la corriente de aire necesaria a la alberca que contiene el arroz que se desea secar. En nuestro caso, se utilizó un ventilador centrífugo con álabes inclinados hacia adelante; por lo cual se le considera un ventilador Sobrecargable, debido al comportamiento de su consumo de potencia cuando deben vencer resistencias reducidas.



**Figura 4.4 Ventilador centrífugo**

Se escogió este tipo de ventilador, debido a que:

- No se quería introducir dicho ventilador en el propio ducto, pues aumentaría el diámetro del mismo.
- La resistencia (en este caso, la cantidad de arroz que se desea secar), no tendrá variaciones significativas, por lo cual el motor no requeriría tener tanta potencia.

Las características técnicas que presenta el ventilador son:

**Velocidad de giro:** 1040 R.P.M. bajo carga

Igualmente, el ventilador presenta como características físicas:

**Diámetro total:** 22.5 cm

**Ancho de los álabes:** 1 cm

**Longitud de los álabes:** 12 cm

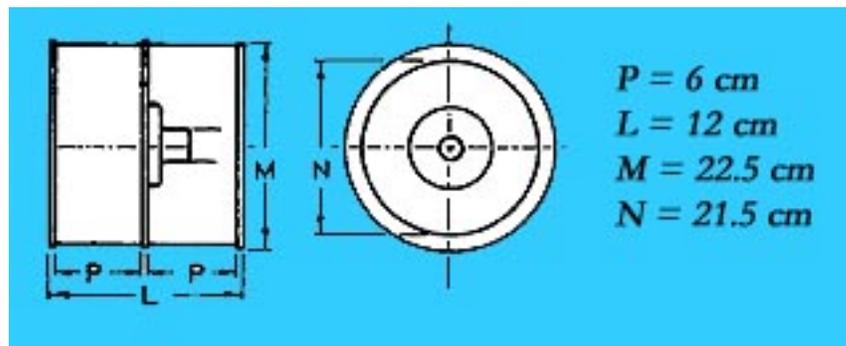


Figura 4.5. Dimensiones del ventilador

El ventilador posee adicionalmente su respectiva carcasa de acero galvanizado con las dimensiones mostradas:

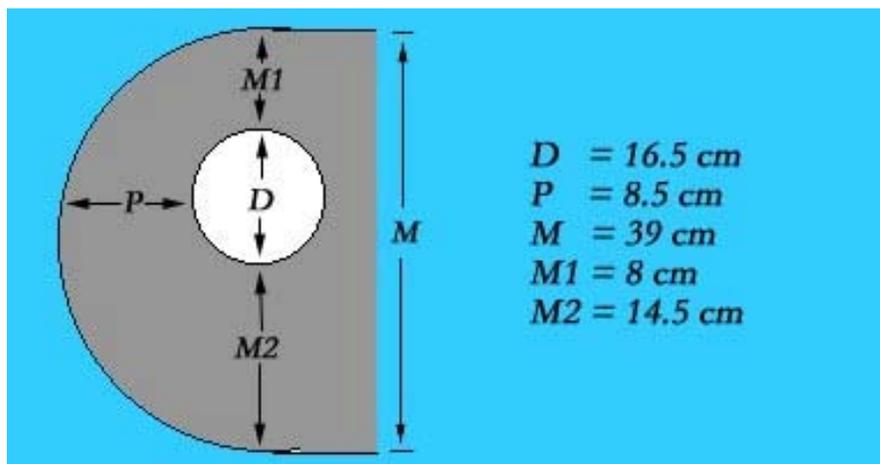
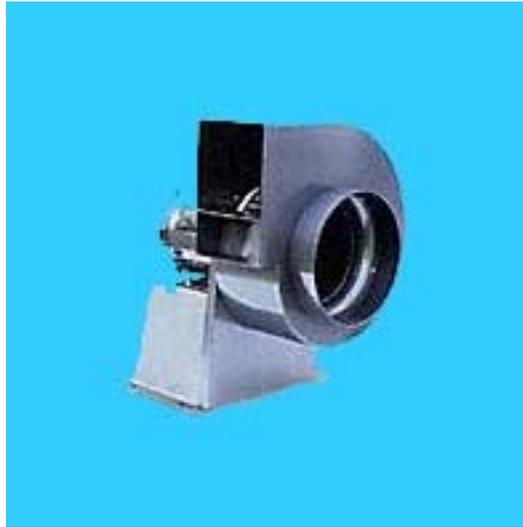


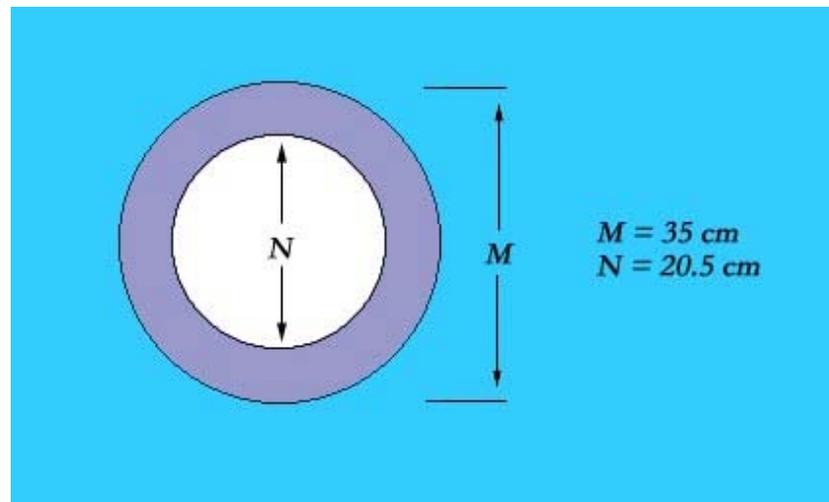
Figura 4.6. Dimensiones de la carcasa

En la siguiente figura se muestra la forma en que se encuentran acoplados el motor, el ventilador y la carcasa de acero galvanizado que guía el flujo de aire.



**Figura 4.7. Carcasa de acero galvanizado**

El ventilador se encuentra acoplado directamente al eje del motor, mientras que la boquilla o salida de su carcasa se encuentra acoplada a un ducto; cuyo diámetro interno es de 20.5 cm y su diámetro externo es de 35 cm, con una longitud de 26 cm. como se muestra en la siguiente figura 4.8.



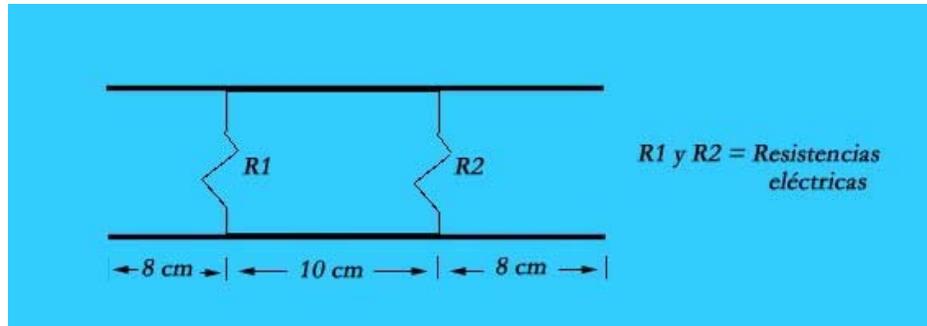
**Figura 4.8. Dimensiones del ducto**

El ducto está construido con una lámina de aluminio de 1/16 tanto para el diámetro interno como externo; entre los cuales se encuentra ubicada una fibra que tiene por función principal mantener el calor concentrado en el ducto interno.

**4.2.3 Resistencias Eléctricas** La función de las resistencias eléctricas es simular una fuente de calor que permita inyectar aire a la alberca que contiene el arroz.

De acuerdo a las consideraciones de calidad propias del secado del grano de arroz; que recomienda secado a temperaturas comprendidas entre 40°C - 60°C, se escogieron dos resistencias, las cuales proporcionan valores de temperaturas que se encuentran dentro de dicho rango.

Las dos resistencias eléctricas se encuentran ubicadas dentro del ducto interno como se muestra en la figura 4.9.



**Figura 4.9. Vista lateral de la disposición de las resistencias eléctricas en el ducto**

Como se puede observar las resistencias se colocaron de la forma indicada anteriormente, debido a que se pretende aprovechar el diámetro relativamente reducido del ducto para concentrar y homogeneizar a una temperatura adecuada el aire proveniente del ventilador.

Las características técnicas de las resistencias eléctricas son:

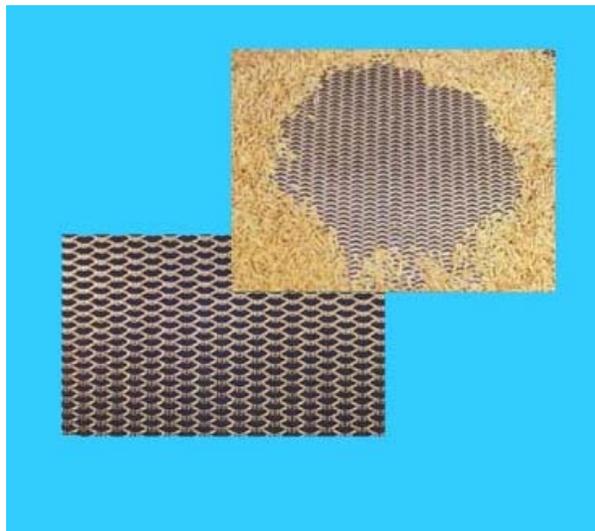
**Potencia:** 1200 W

**Voltaje:** 110 V

**4.2.4 Alberca** La alberca tiene por función alojar la cantidad de arroz que se desea secar, y para ello cuenta con una zaranda que permite solo el paso del flujo de aire caliente proveniente del ducto atravesando ésta en forma ascendente hasta alcanzar la capa superior del arroz.

La zaranda requiere de dimensiones especiales las cuales aseguren que el grano no atraviese los orificios de la misma, además debe ser capaz de resistir el peso propio de la capa de arroz.

La zaranda utilizada, comercialmente se conoce como zaranda de 32 X 32 de manera que sus orificios tengan un área de  $1,5 \text{ mm}^2$ .



**Figura 4.10. Zaranda para el secado de arroz**

Las dimensiones de la zaranda son:

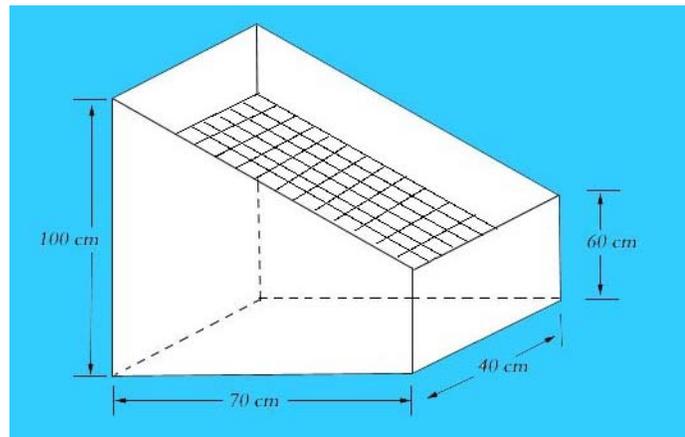
**Ancho:** 36.5 cm

**Largo:** 79.5 cm

Estas dimensiones se establecieron teniendo en cuenta las características de la alberca, tales como la inclinación, profundidad, ancho y altura.

La alberca diseñada es de fondo perforado e inclinado, con el fin que el proceso de cargue y descargue de arroz sea más fácil. La alberca tiene capacidad máxima de 50 Kg de arroz.

La arquitectura y dimensiones de la alberca se muestran en la figura 4.11, el cual es un diseño a una escala de 1:250 en la capacidad de las albercas típicas utilizadas en la agroindustria arrocera los Tamacos.



**Figura 4.11. Arquitectura y dimensiones de la alberca.**

Las láminas utilizadas para la construcción de la alberca son de acero galvanizado fijadas en ángulos de hierro para darle la estructura apropiada.

### **4.3 ESPECIFICACIONES DEL PROTOTIPO DEL SENSOR**

En forma general, es un medidor de humedad en línea el cual consta de un grupo de electrodos operando como elemento primario que se conectan físicamente a un circuito de medición de humedad, que contiene a su vez un circuito de calibración, alimentación y por último un circuito selector de modo de operación, con el fin de proporcionar una salida de corriente equivalente al valor real del contenido de humedad del grano de arroz con su respectiva corrección por temperatura.

**4.3.1 Método de medición de humedad utilizado por el sensor** El método de medición del sensor que se escogió para el proyecto corresponde a un método indirecto de medición de humedad, específicamente es un método eléctrico de variación por resistencia o conductividad de la muestra de arroz de acuerdo al contenido de humedad que dicha muestra posea.

Se escogió este tipo de método de medición debido a que:

- Mantiene la muestra a una presión constante (6 electrodos), asegurando condiciones de medición iguales para todas las muestras a analizar.
- Brinda mayor superficie de contacto, mejor distribución del grano.
- Presenta una buena rapidez en la toma de medición.
- Permite medición en línea.

- Ofrece una alta precisión, y sus resultados son reproducibles.
- Los métodos eléctricos para la medición de humedad de cereales son relativamente fáciles de mantener ajustados y de acuerdo entre sí.
- La densidad del material, en este caso el grano de arroz, no afecta la medida de humedad.
- Las condiciones óptimas requeridas para la medición con este método son más fáciles de mantener constante a diferencia de otros métodos como el capacitivo en el cual se requiere que las placas estén totalmente llenas del grano de arroz a analizar.

Teniendo en cuenta las características y el método de medición seleccionado se requiere la utilización de los siguientes elementos, los cuales se pueden agrupar según su funcionalidad en:

- Elemento primario.
- Etapa de medición.

Circuito de alimentación.

Circuito de calibración y determinación.

Circuito selector de modo de operación.

**4.3.1.1 Elemento primario** El elemento primario está en contacto con la muestra del grano a analizar y se introduce en la capa de arroz, de manera que dicha

muestra se encuentre en el espacio comprendido entre los electrodos, permitiendo un flujo de corriente que corresponde a la resistencia propia del grano, debido a la humedad en el momento de la medición.

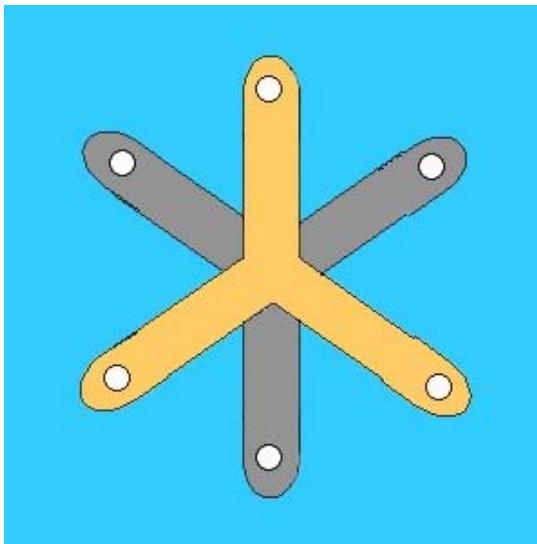
El elemento primario está compuesto por seis electrodos de acero inoxidable o bronce tipo punta, cubriendo un área de 8,6 cm<sup>2</sup>.

$$A = \frac{\pi * D^2}{4} \quad (4.1.)$$

$$D = 3.3cm$$

$$A = 8.6cm^2$$

Dichos elementos están dispuestos de manera que cada grupo de tres electrodos se encuentren unidos o sean un punto eléctrico común; por lo tanto se obtendrían dos nodos de tres electrodos cada uno, como se muestra en la figura 4.12.



**Figura 4.12. Disposición de los electrodos.**

Los conductores utilizados están contruidos de bronce y en forma de “Y”, debido a las buenas características de conductividad que este material presenta. En este caso, los tres electrodos que están unidos por el conductor en forma de “Y” de color amarillo formarán un nodo, mientras que el otro nodo estará conformado por los tres electrodos que están unidos por el conductor de color gris.

Las dimensiones tanto para los electrodos de bronce como de acero inoxidable se tomaron teniendo en cuenta la profundidad de la capa de arroz sobre el cual se trabaja, cuyo valor es de 25 cm. de manera que se abarcara la mayor cantidad posible de capas sin que los electrodos tengan contacto alguno con la zaranda donde se deposita el arroz, obteniendo de esta forma una lectura de humedad más representativa y evitando cualquier distorsión que pueda proporcionarse en la medición a causa del roce de los electrodos con la zaranda.

Adicionalmente, se tuvo en cuenta al escoger el diámetro específico de los electrodos, que se obtuviera rigidez por parte del elemento primario al momento de ser introducido en la muestra de arroz que se desea analizar, asegurando a su vez condiciones constantes de factores como presión, cantidad de muestra a medir y superficie de contacto, debido a que se imposibilita de esta forma la probabilidad que ocurran cambios mecánicos en el elemento primario.

Teniendo en cuenta los factores antes mencionados se consideraron adecuados las siguientes dimensiones para los electrodos.

**Longitud:** 15.5 cm.

**Diámetro:** 0.32 cm.

Se seleccionó el acero inoxidable y el bronce como materiales para construir los electrodos, debido a las características que dichos materiales presentan.

El acero inoxidable es una aleación de hierro, carbono y cromo o níquel. La principal característica del acero inoxidable es su resistencia a la corrosión debido a la protección que le da el níquel, que se oxida en la superficie y que impide que penetre al interior de la pieza, por lo tanto el grano no se encuentra expuesto a sustancias que puedan influir en la calidad final del grano.

Otras propiedades que se tuvieron en cuenta para la selección de este material son su excelente resistencia mecánica, garantizando una presión constante sobre el volumen específico donde se encuentra la muestra del grano. Además posee muy buena resistencia a la corrosión a altas temperaturas, por lo cual se asegura que los electrodos mantengan sus características y propiedades físicas durante todo el tiempo en que se lleve a cabo el proceso de secado.

Por su parte, el bronce es una aleación de cobre y estaño con pequeñas cantidades de plomo, cinc y plata que se caracteriza por ser una aleación dura, superada por el acero pero más resistente a la corrosión que éste. La proporción del bronce empleado para los electrodos es del 8% de estaño.

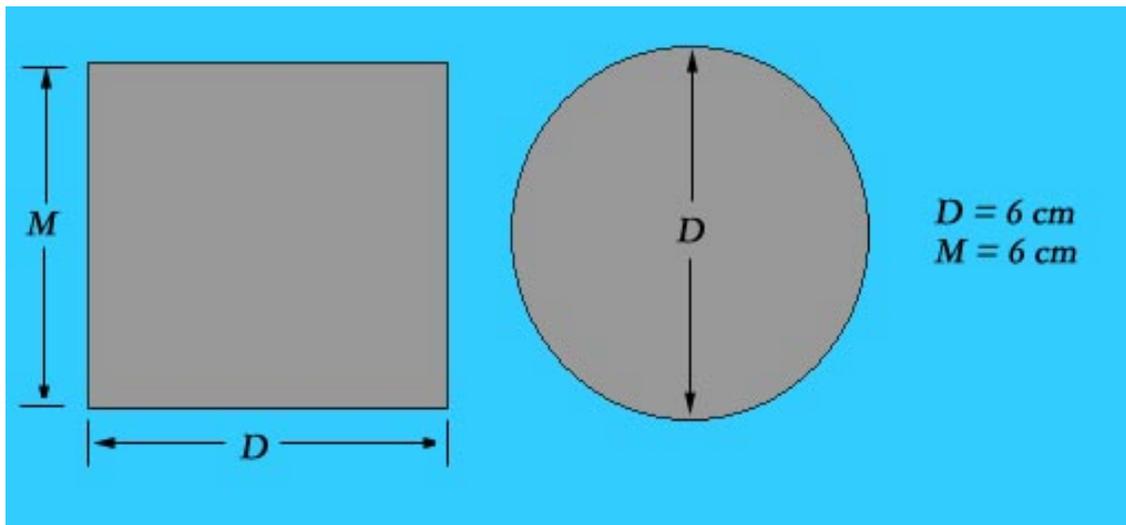
En general, algunas propiedades y características relevantes del acero inoxidable y el bronce se presentan en el siguiente cuadro comparativo:

**Cuadro 4.1. Cuadro comparativo entre bronce y acero**

<b>MATERIAL</b>	<b>ACERO INOXIDABLE</b>	<b>BRONCE</b>
<b>PROPIEDADES</b>		
<b>Resistividad eléctrica</b>	72 $\mu\text{Ohms}$	14-17 $\mu\text{Ohms}$
<b>Densidad</b>	8.027 $\text{g/cm}^3$	8.9 $\text{g/cm}^3$
<b>Dureza</b>	150	135
<b>Conductividad térmica</b>	0.030 $\text{cal/cm}^*\text{seg.}$	0.019 $\text{cal/cm}^*\text{seg.}$
<b>Peso</b>	10.8 g. (electrodo)	11 g. (electrodo)

Adicionalmente, estos electrodos se encuentran montados en un soporte debidamente asilado; en el cual está la unión de los dos nodos de tres electrodos y las dos terminales que se llevarán al circuito de medición de humedad.

El soporte está construido de aluminio en forma cilíndrica, sus dimensiones se realizaron acordes a la distancia de separación deseada entre cada uno de los electrodos, el área total que se pretende cubrir y conservando las características que hagan de este elemento un instrumento de fácil manipulación por parte del usuario, con el fin de desplazarlo a cualquier punto deseado. Igualmente, éste brinda la función de protección de los nodos o puntos de uniones de los electrodos. En la figura 4.13. se muestra las dimensiones del soporte.

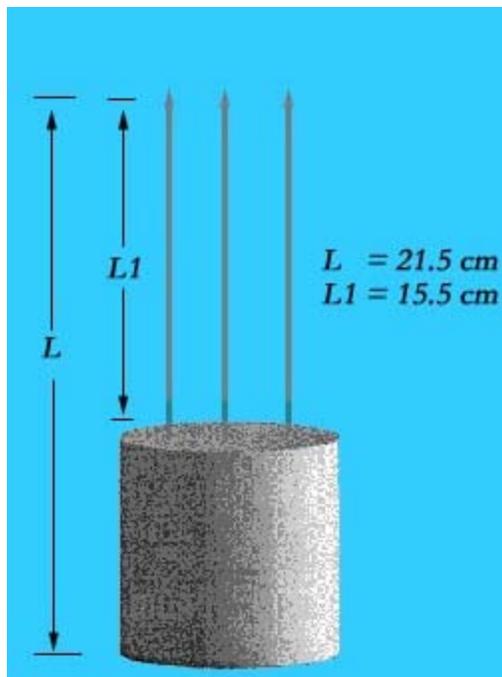


**Figura 4.13. Vista frontal y superior del soporte del elemento primario**

Con el fin de proporcionar aislamiento a cada uno de los electrodos entre sí, y a su vez entre dichos electrodos y el soporte se utilizó una lámina aislante plástica termoestable o termofija (Baquelita o Bakelita). Este material fue empleado teniendo en cuenta sus características de: Aislante, resistente al calor, resistente al agua, resistente a agresiones químicas y mecánicas.

La resistencia al calor garantiza que este material soportará las temperaturas propias del proceso de secado de arroz superiores a la temperatura ambiente (45 °C a 60 °C).

Así mismo la resistencia al agua que presenta la baquelita, asegura que este material no presente variaciones ante altos porcentajes de humedad a los que estará expuesto durante el proceso de secado de arroz. La lámina aislante, a su vez funciona como soporte para los electrodos y acople de estos con el soporte, como se muestra en la figura 4.14.



**Figura 4.14. Elemento primario**

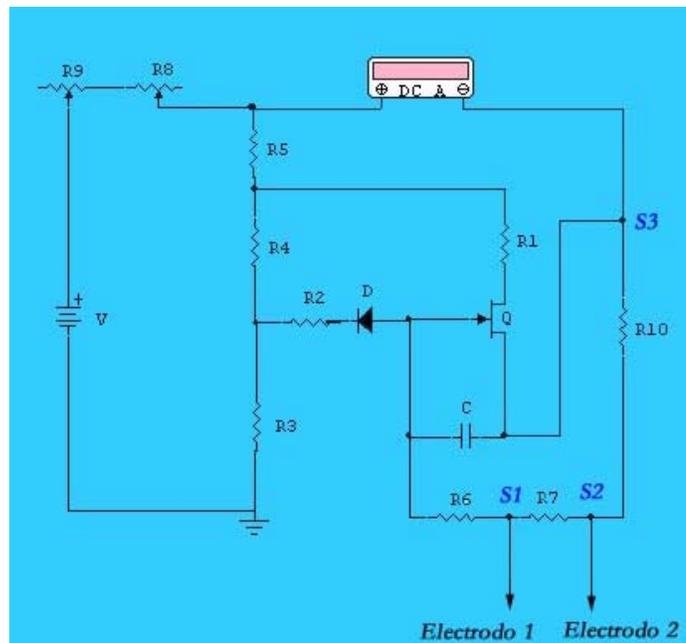
**4.3.1.2 Etapa de medición** La etapa de medición del sensor del contenido de humedad se encarga de proporcionar el valor de humedad del arroz proveniente

de las variaciones de resistividad que se presentan en el elemento primario. Las variaciones de resistividad ocasionadas por el cambio de humedad en la muestra de arroz se expresan en términos de corriente, para ello esta etapa consta de tres circuitos con funciones específicas dentro de los cuales se encuentra:

➤ **Circuito selector de modo de operación** Adicionando este circuito a la etapa de medición de humedad se tiene la posibilidad de escoger el modo de operación del medidor, a partir de las distintas conexiones de los elementos que hacen parte tanto de la etapa del circuito selector como del circuito de medición.

Los modos de operación son en total cuatro, correspondientes a los modos de medición 1 y 2 y sus respectivos modos de calibración.

• **Modo de medición 1** Este modo de medición se ha diseñado para medir porcentajes de humedad en un rango amplio de corriente, entre 10  $\mu\text{A}$  y 300 $\mu\text{A}$  tanto para el electrodo de acero, como para el de bronce.



**Figura 4.15. Circuito en modo de medición 1**

Los terminales S1, S2 y S3 mostrados en la figura 4.15. son puntos que conmutan con terminales de algún elemento del circuito de medición. Estas terminales corresponden a:

S1: Terminal del electrodo 1

S2: Terminal del electrodo 2

S3: Terminal superior de la resistencia  $R_{10}$

En este modo de operación el selector permite conectar en forma simultánea S1 con la resistencia  $R_6$  y S2 con la resistencia  $R_{10}$ , mientras S3 une la resistencia  $R_{10}$  con la terminal fuente del JFET y con el punto donde se realiza la medición de corriente.

- **Modo de calibración 1** Este modo de operación se ha diseñado para ajustar a un valor determinado de corriente de  $70 \mu\text{A}$  (para ambos electrodos) en el circuito, antes de realizar la medición, con el fin que los valores de corriente resultantes siempre correspondan a los verdaderos valores de humedad del grano de arroz obtenidos mediante la calibración del equipo con un medidor patrón.

La calibración del instrumento a un valor de corriente de  $70 \mu\text{A}$  se debe a que el valor mínimo de corriente obtenido en el momento de la medición (mayor resistencia entre los electrodos en modo de medición 1) se encuentre en un rango que sea posible medir, en nuestro caso de  $10 \mu\text{A}$ .

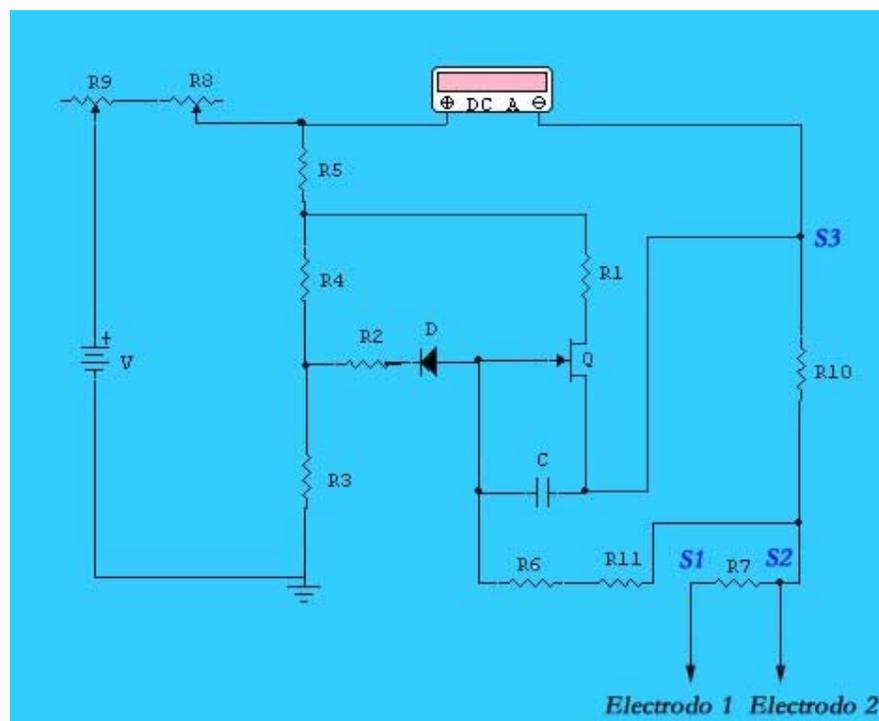


Figura 4.16. Circuito en modo de calibración 1

En este modo de operación, mostrado en la figura 4.16., el selector permite conectar en forma simultánea S2 con la resistencia  $R_{10}$  y con la resistencia  $R_{11}$ , mientras que S3 permanece en la posición de modo de medición 1. La finalidad de este arreglo es evitar la influencia de cualquier variación de resistividad entre los electrodos, dejando fuera de funcionamiento a  $R_7$  (elemento primario), mediante la desconexión de S1 con cualquier elemento del circuito.

- **Modo de medición 2** Este modo de medición se ha diseñado para medir porcentajes de humedad en un rango de corriente entre  $0.14 \mu\text{A}$  y  $165 \mu\text{A}$ . En este modo de operación el selector conecta S1 a tierra, y a su vez S2 con la resistencia  $R_{10}$ , mientras S3 une la resistencia  $R_{10}$  con el punto donde se realiza la medición de corriente como se muestra en la figura 4.17.

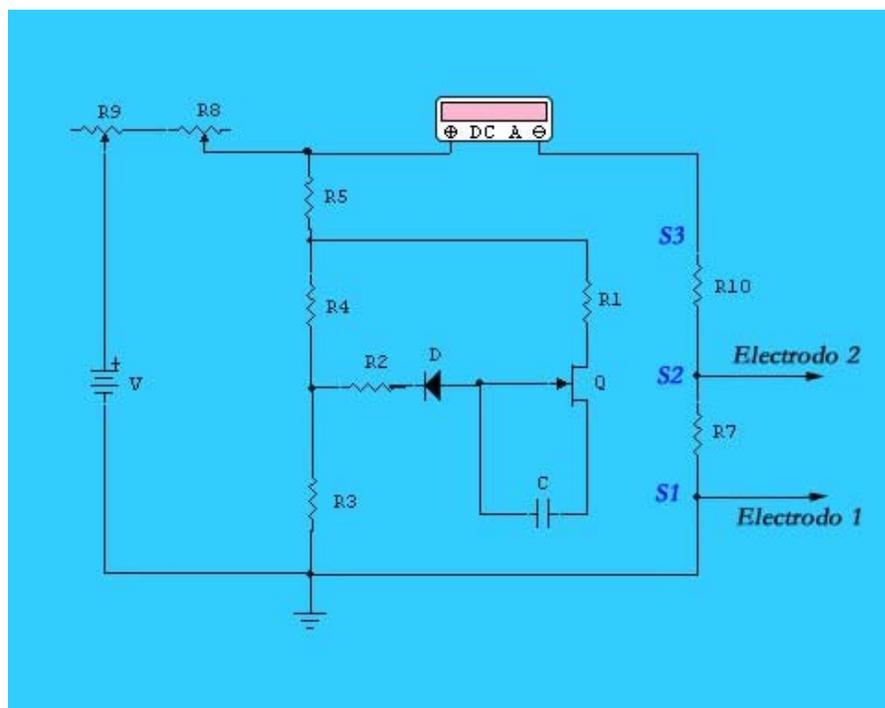
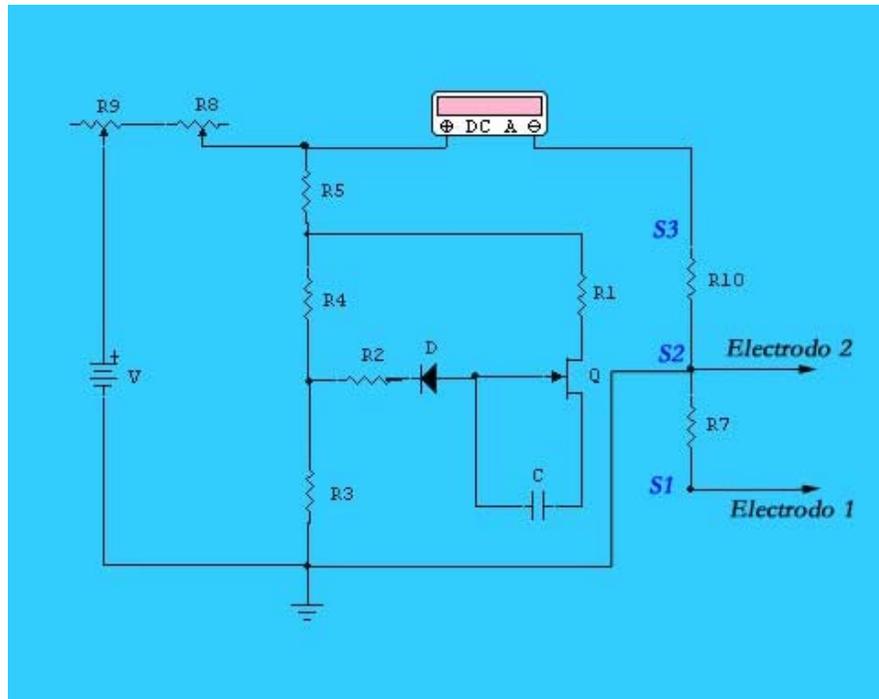


Figura 4.17. Circuito en modo de medición 2

- **Modo de calibración 2** Este modo de operación se ha diseñado para ajustar a un valor determinado de corriente de  $165 \mu\text{A}$  (para ambos electrodos) en el circuito, antes de realizar la medición, cumpliendo con la misma función que el modo de calibración 1 pero esta vez para el modo de medición 2.

La calibración del instrumento a un valor de corriente de  $165 \mu\text{A}$  se debe a que el valor mínimo de corriente obtenido en el momento de la medición (mayor resistencia entre los electrodos en modo de medición 2) se encuentre en un rango que sea posible medir, en nuestro caso de  $0.14 \mu\text{A}$  para ambos tipos de electrodos.

En este modo de operación mostrado en la figura 4.18. el selector conecta en forma simultánea S2 a tierra y con la resistencia  $R_{10}$ , mientras que S3 permanece en la posición de modo de medición 2. En este caso, S1 se desconecta de cualquier elemento del circuito con el fin de evitar la influencia de cualquier variación de resistividad entre los electrodos.



**Figura 4.18. Circuito en modo de calibración 2**

➤ **Circuito de determinación para el modo de medición 1** La determinación del contenido de humedad se realiza a través de un circuito constituido principalmente de un transistor de efecto de campo de unión (JFET) caracterizado por ser un dispositivo unipolar que presenta ventajas sobre otro tipo de transistores y un arreglo de diodos, capacitores y resistencias variables.

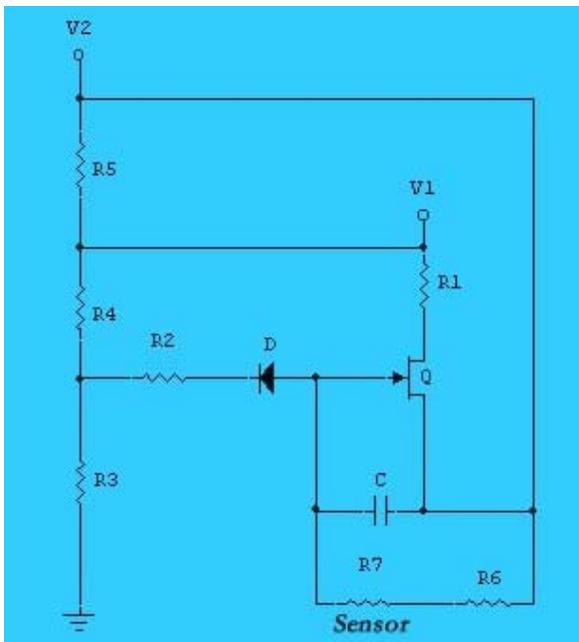
Algunas consideraciones que se tuvieron en cuenta al momento de seleccionar un JFET fueron:

- Los valores de resistencia típicos del grano de arroz en los rangos de humedad son relativamente altos, situación por la cual, se aprovecha la característica del

JFET que consiste en presentar sensibilidad a la tensión al momento de tener una alta impedancia de entrada.

- La generación de muy poco ruido, característica que es necesaria debido a la alta precisión requerida y a los valores de corrientes del orden de los microamperios con los cuales se opera.
- La estabilidad que proporcionan estos elementos ante las altas temperaturas.

La figura 4.16. muestra el diagrama esquemático del circuito de medición implementado para el modo de medición 1.



**Figura 4.19. Circuito en modo 1 de medición de humedad**

Este circuito proporciona un cambio de corriente ante una variación en la resistencia entregada por el sensor. Básicamente el cambio de corriente es

causado por el arreglo o disposición de las distintas resistencias y los valores de voltajes presentes tanto en la terminal drenaje como en la fuente.

De acuerdo al propósito de dicho circuito, se hace  $V_{DS}$  (voltaje drenador-fuente) mucho mayor que  $V_{GS}$  (voltaje compuerta-fuente), con el fin que este último determine cuanta corriente circule entre la fuente y el drenador.

Por medio de la resistencia  $R_5$  podemos variar el valor de tensión de  $V_{DS}$ , controlando de esta forma los valores de corriente con los cuales se desea trabajar. Estos valores de corriente pueden ser calculados a través de las siguientes ecuaciones.

$$V_G = \frac{V_1 * R_3}{R_3 + R_4} \quad (4.2.)$$

$$R_G = \frac{R_3 * R_4}{R_3 + R_4} \quad (4.3.)$$

Reemplazando estos valores en el circuito de la figura 4.19. obtenemos una fuente de voltaje  $V_G$ , en serie con una resistencia  $R_G$ , la cual a su vez estará en serie con el diodo que se encuentra conectado con el capacitor y con la compuerta del JFET como se muestra en la figura 4.20.

Aplicando la ley de voltaje de Kirchoff se obtiene:

$$-V_G + I(R_G + R_2 + R_7) + V_2 - V_d = 0 \quad (4.4.)$$

Despejando la ecuación 4.4. obtenemos:

$$I = \frac{V_G + V_d - V_2}{R_G + R_2 + R_7} \quad (4.5.)$$

Donde  $I$  es la corriente que circula a través del diodo como se muestra en la figura 4.20.

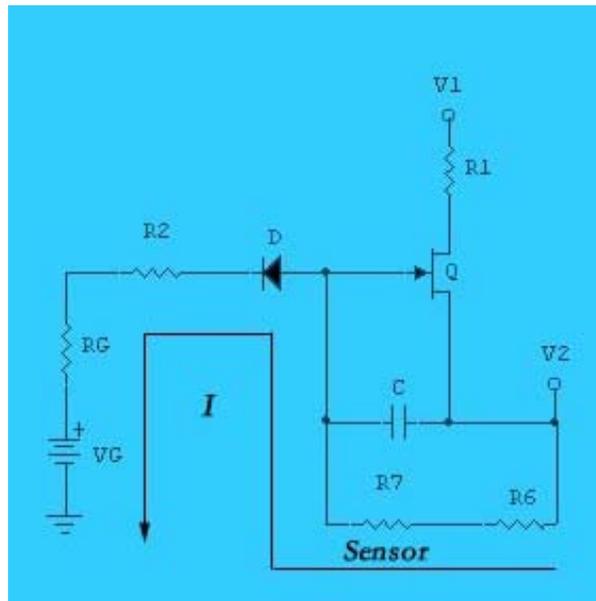


Figura 4.20. Circuito equivalente de la etapa de medición de humedad

La corriente de drenaje se determina aplicando ley de voltaje de Kirchhoff:

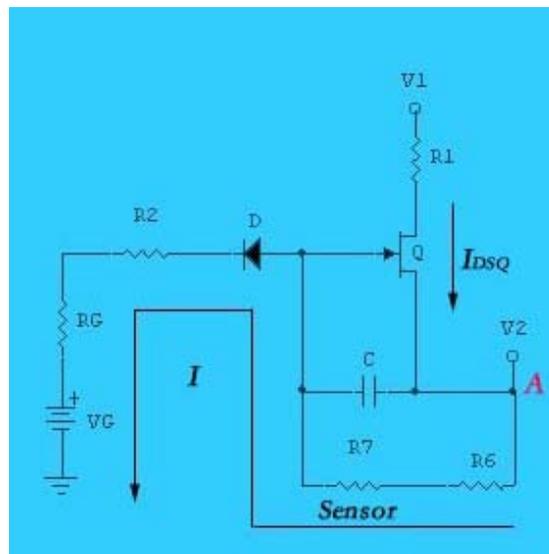
$$-V_2 + V_{DSQ} + I_{DSQ}(R_1) + V_1 = 0 \quad (4.6.)$$

Despejando  $I_{DQ}$  se obtiene:

$$I_{DSQ} = \frac{V_2 - V_{DSQ} - V_1}{R_1} \quad (4.7.)$$

Con los valores de corriente obtenidos en las ecuaciones 4.7. y 4.5. es posible determinar el valor de la corriente resultantes en el nodo A, mostrado en la figura 4.21.

$$\vec{I}_H = \vec{I} + \vec{I}_{DSQ} \quad (4.8.)$$



**Figura 4.21. Análisis de las corrientes de la etapa de medición**

La adición del diodo en el circuito de la compuerta permite asegurar un comportamiento estable del circuito de medición, ante un amplio rango de variaciones de temperatura.

Durante el tiempo de la medición se debe asegurar que el voltaje compuerta-fuente no varíe a causa de las perturbaciones que puedan ocurrir al interior del

circuito de medición, por lo tanto se introduce un capacitor entre las terminales de la compuerta y la fuente del JFET, permitiendo de esta forma que la variación del voltaje  $V_{GS}$  solo se presente por el cambio en la resistencia del grano de arroz. El valor de este capacitor dependerá de la precisión que se desee obtener en la lectura del valor de humedad.

Por otra parte, el circuito de calibración es el encargado de proporcionar condiciones constantes y previas a la medición, con el fin de garantizar que la lectura de humedad se efectuará bajo los mismos parámetros en diferentes ocasiones de uso del medidor de humedad.

El circuito de calibración consta básicamente de dos resistencias variables conectadas en serie (figura 4.22.), las cuales permiten ajustar el voltaje proveniente de la fuente de alimentación a un voltaje de operación deseado a la entrada de la etapa de medición. Este voltaje se tomó considerando el rango óptimo de funcionamiento del JFET en su región activa, manteniendo los voltajes de polarización adecuados en las terminales de fuente y drenaje del transistor. Así mismo, se tuvo en cuenta asegurar que el voltaje compuerta-fuente ( $V_{GS}$ ) sea en todo momento (valor máximo y mínimo de humedad) mayor que el  $V_{GS0}$  (voltaje de estrangulamiento – dado por el fabricante) con el fin que la corriente  $I_{DSQ}$  no sea cero.

Cabe anotar, que este método de ajuste se debe realizar específicamente en el modo de calibración 1 con el fin de realizar una correcta calibración de acuerdo al valor registrado como punto de referencia y obtener los resultados esperados.

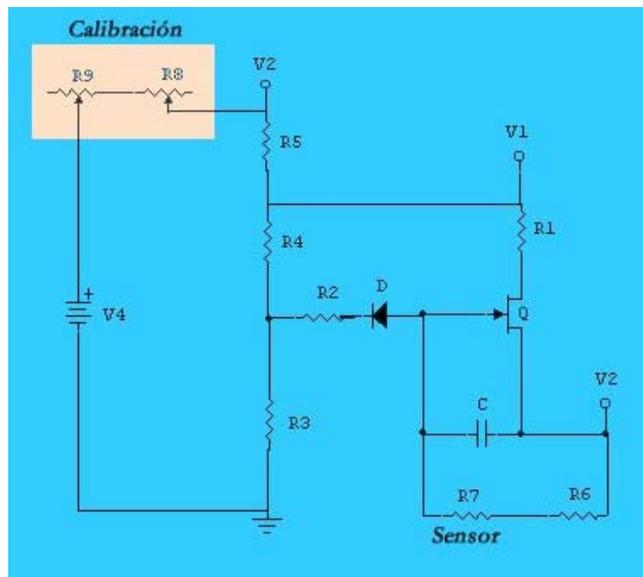
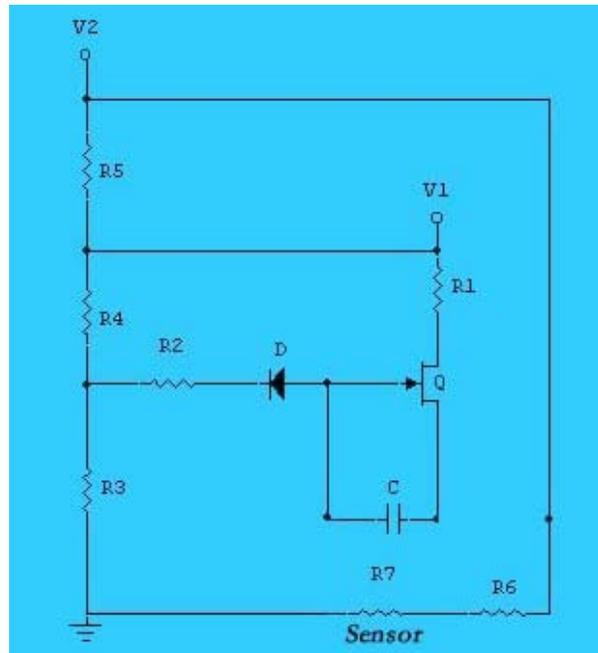


Figura 4.22. Etapa de calibración y medición para el modo 1 de medición

➤ **Circuito de determinación para el modo de medición 2** En este caso, se utilizan prácticamente los mismos elementos empleados en la determinación de humedad para el modo de medición 1, pero a diferencia no existe la conexión entre el elemento primario y la terminal compuerta del JFET, ni se conecta  $R_{10}$  con la respectiva terminal fuente del mismo, como se muestra a continuación en la figura 4.23.



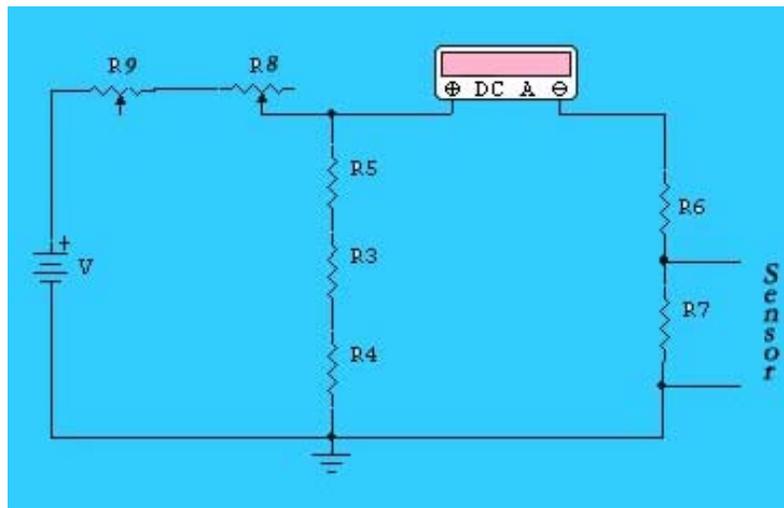
**Figura 4.23. Circuito en modo 2 de medición de humedad**

En este caso, la determinación del contenido de humedad básicamente se realiza a través de un arreglo sencillo de resistencias variables en paralelo con el circuito de alimentación y calibración.

Teniendo en cuenta la característica de los electrodos empleados en el diseño basados en la variación de la resistencia de acuerdo al cambio de humedad del grano, se implementó un circuito de medición capaz de detectar estas variaciones y convertirlas a una variable que pueda ser medida con instrumentos usuales, y que además brinde la oportunidad de realizar posteriores tratamientos como control por computador, PLCs u otros dispositivos. Adicionalmente, este circuito es muy práctico y fácil de construir.

Con el fin de ser más prácticos, en este circuito se emplearon los mismos valores de resistencias, la misma etapa de calibración y alimentación del circuito de medición 1 (explicado anteriormente), lo que permitió no solo disminuir la cantidad de elementos en el diseño y construcción del prototipo, sino reducir el costo del mismo.

La figura 4.24. muestra el diagrama esquemático del circuito de medición implementado para el modo de medición 2 con su respectiva etapa de calibración.



**Figura 4.24. Circuito equivalente en modo 2 de medición de humedad**

El circuito de la figura 4.24. experimenta un cambio de corriente en la rama que contiene el sensor ocasionado por la variación de resistencia que este presenta.

Con el fin que la configuración de la figura 4.24. no sea afectada por la presencia del circuito de polarización del JFET del modo de medición 1, mostrado en la

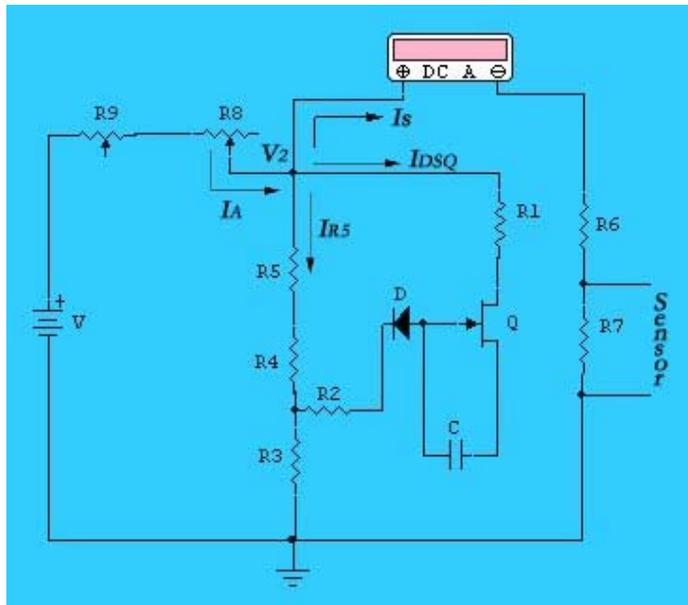
figura 4.19 se interrumpe a través del circuito selector de modo de operación (trabajando en modo de medición 2) la alimentación del terminal fuente del JFET por parte de  $V_2$ , como se muestra en la figura 4.25.

De esta forma, se garantiza que la diferencia de potencial entre el terminal de compuerta y el terminal fuente sea más negativa que el voltaje de estrangulamiento, por lo tanto sin importar la variación del voltaje drenaje fuente, la corriente  $I_{DSQ}$  será despreciable en todo momento en que se este llevando a cabo la medición de humedad a través del circuito en modo de medición 2. como consecuencia el valor de la corriente  $I_s$  a través del sensor ( $R_7$ ), mostrada en la figura 4.25 estará determinada por la siguiente ecuación.

$$I_S = \frac{V_2}{R_6 + R_7} \quad (4.9.)$$

$$I_A = I_S + I_{DSQ} + I_{R5} \quad (4.10.)$$

Donde  $I_{DSQ}$  es aproximadamente cero (Del orden de pA)

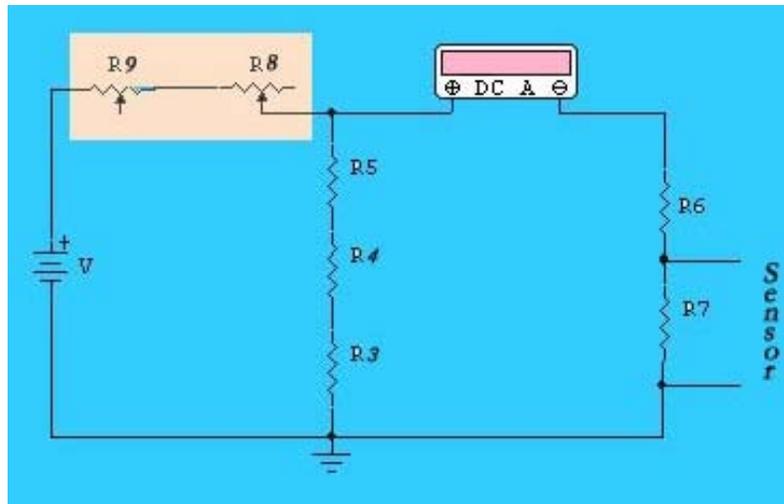


**Figura 4.25. Circuito en modo 2 de medición de humedad**

Por otra parte, el circuito de calibración en este caso proporciona condiciones esencialmente de la corriente de alimentación  $I_A$  constante previa a la medición, con el fin de garantizar que la lectura de humedad se efectuará bajo los mismos parámetros en diferentes ocasiones de uso del medidor de humedad.

Al igual que para el circuito en modo de medición 1, el circuito de calibración consta de las mismas dos resistencias variables conectadas en serie (figura 4.22.), las cuales permiten ajustar la corriente de alimentación proveniente del circuito de la fuente de alimentación a una corriente de operación deseada en la entrada de la etapa de medición. Esta corriente se tomó considerando que el rango de variación de la corriente en la medición tuviese el mayor valor de corriente posible entregado por el equipo con esta disposición.

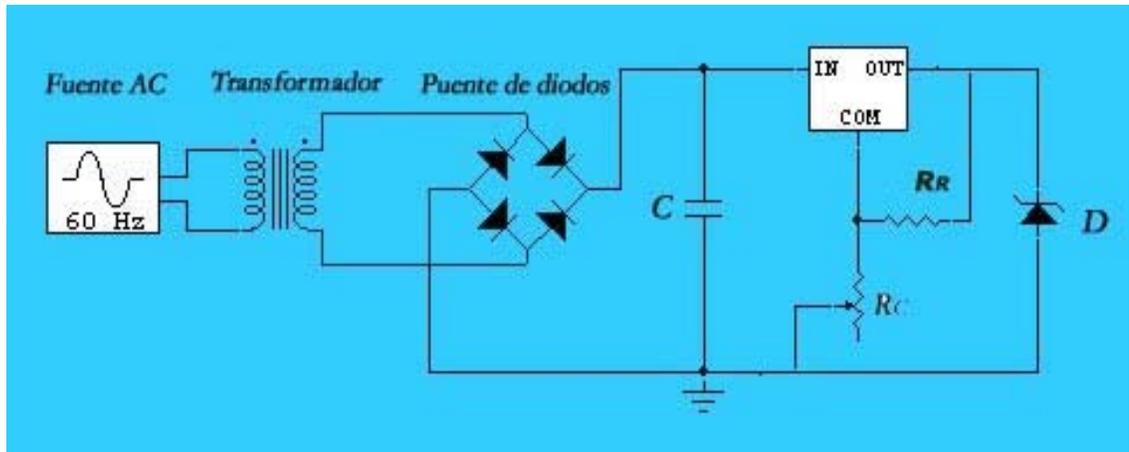
Este método de ajuste se debe realizar específicamente en el modo de calibración 2 con el fin de realizar una correcta calibración de acuerdo al valor registrado como punto de referencia y obtener los resultados esperados.



**Figura 4.26. Etapa de calibración y medición para el modo 2 de medición**

➤ **Circuito de alimentación** Esta etapa tiene por finalidad suministrar y regular el voltaje que requieren los elementos que componen la etapa completa de medición para su correcto funcionamiento.

Esta etapa está constituida básicamente por un transformador de voltaje, un regulador de voltaje variable, un puente rectificador, una resistencia variable, un capacitor, una resistencia y finalmente un diodo Zener como se muestra en la figura 4.27.



**Figura 4.27. Circuito de alimentación.**

La salida del transformador se conecta directamente a un puente de diodos para rectificar la señal de entrada, luego los terminales de salida de éste son conectados a un capacitor polarizado para luego, por medio de un regulador de voltaje, poder ajustar un valor de voltaje DC constante y requerido para el funcionamiento normal del posterior circuito de medición.

La configuración del regulador de voltaje se realiza a través de una resistencia ubicada entre el terminal de salida y el terminal común del regulador y una resistencia variable que se encuentra entre el terminal común del regulador y el terminal negativo del capacitor como se muestra en la figura 4.27.

La resistencia variable  $R_C$  permite el cambio en el nivel del voltaje a la salida del regulador, aumentando la salida a medida que aumentamos su valor de resistencia. La resistencia  $R_R$  asegura que al momento de colocar  $R_C$  (variable) a

un valor muy cercano a cero no coloque en corto circuito las terminales común y salida.

El diodo Zener D colocado en paralelo con la terminal de salida y el terminal negativo del puente rectificador se encarga de fijar un voltaje constante a la entrada del circuito de calibración y medición con el fin que no exista ninguna posibilidad de daños de elementos como el JFET ocasionado por sobrevoltajes.

**4.3.1.3 Diseño de la etapa de medición del prototipo** De acuerdo al análisis realizado en los diferentes circuitos que hacen parte de la etapa de medición del prototipo (circuito selector de modo de operación, circuito de calibración y determinación, circuito de alimentación) y la relación entre ellos en su funcionamiento normal se seleccionaron los elementos con sus valores y referencias como se muestran en la figura 4.28.

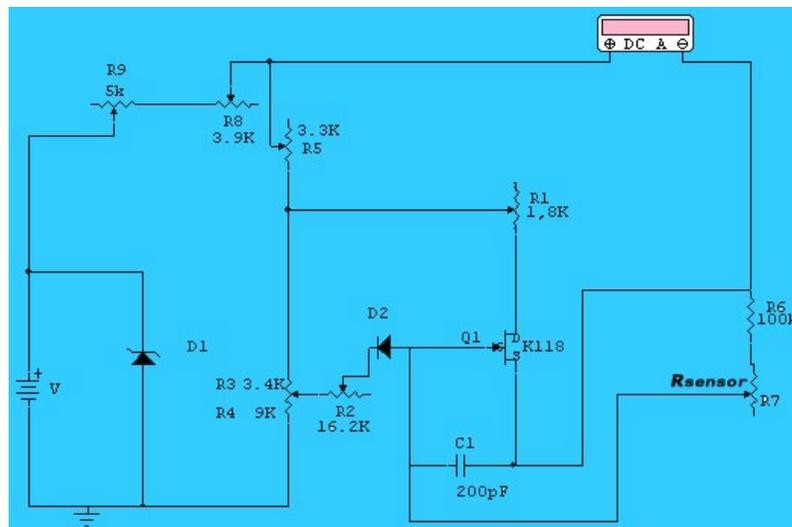


Figura 4.28. Configuración del circuito de medición con valores reales

Para el circuito de alimentación se utilizó un transformador de voltaje cuya relación de transformación es 0.075 con dos salidas AC, una resistencia variable  $R_C$  5K $\Omega$ , una resistencia  $R_R$  220 $\Omega$ , un regulador de voltaje LM317 y un diodo Zener 5012 de 24V.

Con la configuración del regulador de voltaje ( $R_C$  y  $R_R$ ) se pueden obtener variaciones del voltaje de entrada entre 1.3V y 22.5V, de manera que se pueda alcanzar los rangos de valores de funcionamiento del prototipo tanto en los modos de medición como para los de calibración. A su vez, mediante el uso del diodo Zener se obtiene un voltaje de alimentación máximo de 24V, asegurando que el nivel de voltaje se encuentre en el nivel requerido para el funcionamiento de los demás circuitos y a su vez no supere el nivel de voltaje máximo del JFET.

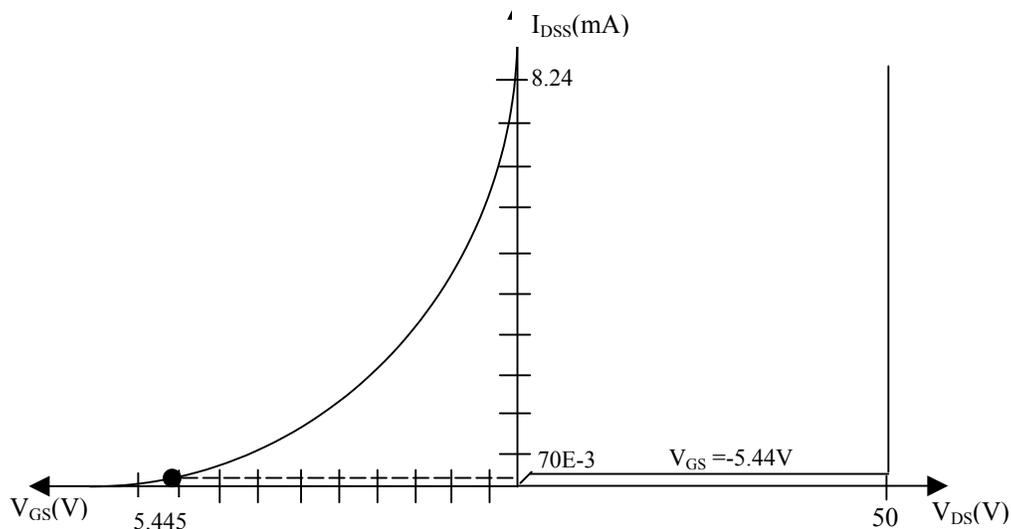
En el circuito de calibración se utilizaron dos resistencias variables de 5K $\Omega$ , las cuales se encargan de variar el voltaje de entrada (proveniente del circuito de alimentación) al circuito de determinación en un rango de aproximadamente de 4.3V. Para efectos del funcionamiento correcto de la etapa de determinación se establecieron los valores de las anteriores resistencias en 3.9 K $\Omega$  y se brinda la posibilidad de variar la segunda resistencia, con el fin de calibrar la corriente de funcionamiento normal a la entrada del circuito medidor de humedad en aproximadamente 1mA. La variación de esta corriente está dada por la siguiente ecuación:

$$I_H = \frac{V - V_2}{R_9 + R_8} \quad (4.11.)$$

$$I_H = \frac{V - V_2}{R_9 + 3.9K\Omega} \approx 1mA$$

$R_5$  ( $3.3K\Omega$ ), se escogió teniendo en cuenta que la diferencia de voltaje entre  $V_1$  y  $V_2$  estuviese entre los rangos de 2V a 3.3V.

En el circuito de medición se utilizó el JFET canal N K118 teniendo en cuenta las curvas características de transferencia, la curva de  $I_D - V_{DS}$ , y las curvas  $I_D - V_{GS}$ .



**Figura 4.29. Curvas características del JFET**

Teniendo en cuenta que el diseño se hizo partiendo del circuito de calibración modo 1 para una corriente de trabajo de  $70\mu A$  ( $I_{DSQ}$ ) se observa, en la curva de característica de transferencia del JFET, el valor de  $V_{GSQ}$  que corta la gráfica en el punto Q de trabajo.

Se selecciona igualmente el valor de  $V_{DSQ}$ , que en este caso corresponderá al 28% del voltaje  $V_{DD}$ , garantizando el funcionamiento del JFET en la región activa, por lo tanto:

$$V_{DSQ} = \frac{28 * V_{DD}}{100} \quad (4.12.)$$

$$V_{DSQ} = \frac{28 * 10.8V}{100} = 3.024V \approx 3V$$

Asegurando que la potencia disipada por el JFET sea inferior a la máxima potencia disipada, se tiene:

$$P_{D(\max)} = 250mW$$

$$P_D = 10.8V * 70\mu A \quad (4.13.)$$

$$P_D = 0.76mW$$

La ganancia del JFET queda determinada por la siguiente ecuación:

$$g_m = g_{m0} \left( 1 - \frac{V_{GS}}{V_P} \right) \quad (4.14.)$$

Donde  $g_{m0}$  o transconductancia en directo para  $V_{GS}$  igual a cero es:

$$g_{m0} = \frac{2I_{DSS}}{-V_P} \quad (4.15.)$$

$$g_{m0} = 2.74mS$$

Por lo tanto:

$$g_m = 5.22mS$$

De acuerdo a la ecuación 4.6. se obtiene  $R_1$ :

$$R_1 = \frac{V_2 - V_1 - V_{DSQ}}{I_{DSQ}} \quad (4.16.)$$

$$R_1 = 1142.9\Omega \approx 1.2K\Omega$$

Ahora se calcula la corriente  $I$ , partiendo de la ecuación:

$$I = \frac{V_{GSQ}}{5.6M\Omega + 100K\Omega} = 0.96\mu A$$

Donde la resistencia de  $5.6M\Omega$ , reemplaza la resistencia del grano de arroz que se toma mediante el elemento primario, con el fin que no sea afectada la calibración por cualquier valor de humedad que se tenga. El valor de dicha resistencia es del orden de los mega ohmios para tratar de simular la mayor resistencia posible y por lo tanto un valor de corriente muy cercano al menor.

De esta forma, calculamos  $V_G$  de la ecuación:

$$V_2 + V_{GSQ} - V_d - V_G + IR_{Total} = 0 \quad (4.17.)$$

Donde  $R_{Total}$  se escoge con un valor de  $19K\Omega$ , por lo tanto:

$$V_G = V_2 + V_{GSQ} - V_d + 0.96\mu A(19K\Omega)$$

$$V_G = 7.82V$$

Luego, mediante el valor de  $V_G$  se procede a calcular el valor de la resistencia  $R_3$ , asumiendo  $R_4$  con un valor de  $9K\Omega$ .

$$V_G = \frac{10.8V * 9K\Omega}{9K\Omega + R_4} = 7.82V$$

Por lo tanto  $R_4$ :

$$R_4 = 3.4K\Omega$$

Con este valor se calcula  $R_2$  de la siguiente manera:

$$R_2 = R_{Total} - R_4 // R_3 \quad (4.18.)$$

$$R_2 = 16.5K\Omega$$

Con el fin de poder realizar ajustes a los valores más determinantes en el funcionamiento normal de la etapa de medición, se optó por utilizar resistencias variables sustituyendo las resistencias que aparecen en la figura 4.15

**4.3.1.4 Estructura física del medidor de humedad** Todos los elementos que hacen parte de la etapa de medición del contenido de humedad se encuentran en el interior de una caja con las siguientes dimensiones:

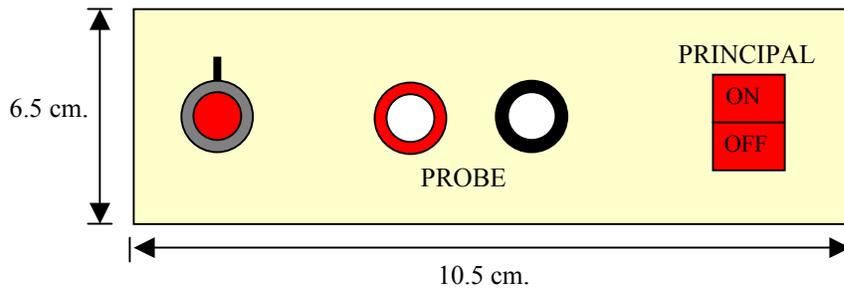
**Ancho:** 10.5 cm

**Largo:** 14 cm

**Alto:** 6.5 cm

En la parte frontal de dicha caja encontramos un interruptor encargado de encender o apagar el medidor, dos terminales de prueba donde se conectan los

terminales o nodos del elemento primario (electrodos) y una resistencia variable  $R_9$  que permite la calibración del medidor, como se muestra en la figura 4.30.



**Figura 4.30. Parte frontal de la estructura física del medidor**

En la parte trasera encontramos un conector que permite la alimentación del medidor, un porta fusible de protección, un selector de cuatro posiciones y dos terminales para la medición de las variaciones de corriente correspondiente a los valores de humedad del grano como se muestra en la figura 4.31. El selector de cuatro posiciones permite escoger el modo de operación del medidor como se muestra en el cuadro 4.1.

**Cuadro 4.2. Modo de operación para el selector de cuatro posiciones**

SIMBOLOGÍA	MODO DE OPERACIÓN
$M_1$	Modo de medición 1
$M_2$	Modo de medición 2
$C_1$	Modo de calibración 1
$C_2$	Modo de calibración 2



**Figura 4.31. Parte trasera de la estructura física del medidor**

## **5. ANÁLISIS DE RESULTADOS**

El prototipo del monitoreo de humedad del sistema de secado de arroz (previo y durante la puesta en funcionamiento) fue sometido a varias pruebas, tanto a la parte del sistema de secado, como al medidor de humedad, con el fin de realizar el respectivo análisis y las recomendaciones, basados en la teoría y a su vez en la experiencia que se tiene en los sistemas de secado de arroz, en las características del grano durante el proceso de secado y en la medición de la humedad del grano a través de métodos resistivo, entre otros.

### **5.1 PRUEBAS DEL SISTEMA DE SECADO**

Las pruebas realizadas tienen como objetivo principal observar el comportamiento real del sistema de secado del prototipo y verificar si dicho funcionamiento se encuentra dentro de los rangos óptimos para realizar el proceso de secado, con el fin de simular de manera semejante las condiciones del proceso real llevado a cabo en las industrias arroceras.

**5.1.1 Prueba N° 1** La primera prueba llevada a cabo con el prototipo consistió en la puesta en marcha del sistema de secado de arroz por albercas con aire caliente, para conocer si los valores de flujo de aire (CFM) y los valores de temperaturas se encontraban o alcanzaban los rangos típicos de los valores del proceso de secado de arroz con este tipo de sistema, es decir, rangos de temperatura entre 35°C - 50°C, aunque muchos autores consideran un valor máximo de temperatura del grano de 63 °C<sup>1</sup> y rangos de CFM de 2,03CFM a 3,5CFM para una alberca con capacidad de secado de 40Kg de arroz.

La primera prueba de la simulación del proceso de secado de arroz con la planta piloto se llevo a cabo de la siguiente manera:

- Se puso en marcha el blower con 2 resistencias de calefacción de 110V, 1200W y con su respectivo motor.
- Se tomaron las primeras mediciones de temperaturas y flujo de la planta piloto, obteniendo los valores registrados en el cuadro 5.1.

**Cuadro 5.1. Medida de los factores al inicio del proceso de secado en la prueba N°1**

FACTORES	40 cm. del ducto	5 cm. del ducto	A la altura de la malla
Velocidad del flujo (m/s)	2.34	2.94	0.4
Temperatura del flujo de aire (°C)	42.77	42.77	41.66

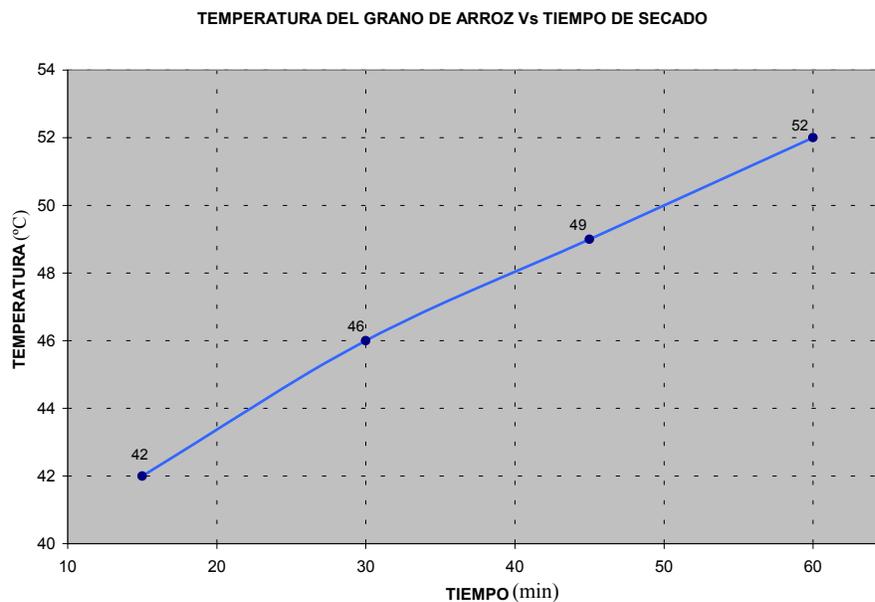
<sup>1</sup> Fuente: De Melo Araujo, Severino

- Se depositaron los 10 Kg de arroz con concha en el interior de la alberca.
- Se registraron durante periodos uniformes de tiempo la temperatura del grano de arroz como se muestra en el cuadro 5.2.

**Cuadro 5.2. Variación de la temperatura del grano de arroz en la prueba N° 1**

TIEMPO (min.)	TEMPERATURA DEL ARROZ (°C)
15	42
30	46
45	49
60	52

Las variaciones de temperatura del grano de arroz durante el proceso de secado se muestran gráficamente en la figura 5.1



**Figura 5.1. Temperatura del grano Vs tiempo de secado para la prueba N° 1**

- Al alcanzar los 70 minutos de estar en funcionamiento la planta piloto, se procedió a finalizar el proceso debido a que la temperatura tanto en el grano como la temperatura del flujo de aire no presentaba variaciones.
- Se efectuó nuevamente la toma de medidas de la velocidad o flujo de aire, con el fin de observar si las características de la planta piloto se mantenían durante todo el proceso. Los resultados obtenidos fueron:

**Cuadro 5.3. Medida de los factores al final del proceso de secado en prueba N° 1**

<b>FACTORES</b>	<b>40 cm. del ducto</b>	<b>5 cm. del ducto</b>	<b>A la altura de la malla</b>
<b>Velocidad del flujo (m/s)</b>	2,09	2,78	0.45
<b>Temperatura del flujo de aire (°C)</b>	51.5	52	45

Después de haber realizado las mediciones de temperatura en el grano y la velocidad de flujo del aire inyectado al mismo, se compararon con los rangos óptimos para el proceso de secado de arroz estipulados por las principales instituciones oficiales para el estudio e investigación de cultivo y tratamiento de arroz, y se obtuvieron durante todo el proceso resultados comprendidos entre los valores reales, simulando correctamente las condiciones reales del proceso en las industrias arroceras, sin embargo, cabe anotar que las mediciones obtenidas se realizaron con una capacidad cinco veces menor a la capacidad diseñada de trabajo de la planta piloto.

En la figura 5.1. se observa el comportamiento progresivo y aproximadamente lineal de la variación de temperatura con respecto al tiempo de funcionamiento de la prueba. Estas variaciones finalizan después de haber transcurrido un tiempo cercano a 60 minutos, donde la temperatura alcanzada (52°C) corresponde a la máxima posible brindada por el sistema que compone la fuente de calor de la planta piloto.

De igual forma, se puede apreciar que los factores del secado, medidos al inicio del proceso, no presentaron variaciones significativas por lo que se comprueba la estabilidad y confiabilidad de la planta piloto.

**5.1.1.1 Equipos utilizados** Para la realización de esta prueba se utilizaron dos instrumentos de medida:

- Un anemómetro y termómetro digital DCFM 8906 para la medición del flujo de aire y su respectiva temperatura.
- Un termómetro infrarrojo Thh-500 Infrarrojo Greenlee para la medición de la temperatura del grano.

**5.1.2 Prueba N° 2** La segunda prueba realizada al prototipo del secado de arroz tenía como finalidad observar el comportamiento de la planta piloto con la cantidad de arroz promedio, sobre la cual se va a trabajar el monitoreo de humedad y verificar las características de la capa de arroz. En esta ocasión, se

analizaron 50 Kg de arroz con concha con valores de humedad típicos de llegada al proceso de secado (22%), con el fin de observar la evolución completa y real del grano ante la exposición al prototipo y a su vez el tiempo de duración del secado completo. De acuerdo a esto, se procedió a realizar el siguiente procedimiento:

- Se efectuó la medición de la temperatura del grano inicialmente (antes de exponerse al proceso) y la temperatura ambiente.
- Se procedió a poner en funcionamiento la planta piloto con la activación, tanto del motor, como las resistencias de calentamiento y luego de 10 minutos se realizó la medición de la temperatura en la cámara de aire.

**Cuadro 5.4. Temperaturas iniciales del proceso de secado**

<b>Temperatura ambiente (°C)</b>	33
<b>Temperatura inicial de la cámara de aire (°C)</b>	43

- Se depositaron los 50 Kg de arroz con concha en el interior de la alberca y se efectuaron las siguientes mediciones. Cada uno de los valores consignados en el cuadro 5.5. corresponde al valor promedio de las medidas de temperaturas efectuadas.

**Cuadro 5.5. Temperatura del grano en el proceso de secado para la prueba N° 2**

<b>Ubicación de la Muestra</b>	<b>T (°C) Valores iniciales</b>	<b>T (°C) 20 min.</b>	<b>T (°C) 40 min.</b>	<b>T (°C) 60 min.</b>	<b>T (°C) 80 min.</b>	<b>T (°C) 100 min.</b>	<b>T (°C) 120 min.</b>
<b>Superior</b>	34	35,5	39	43,5	45,5	47,5	50
<b>Medio</b>	33,5	34	35	39	40	44,5	48,5
<b>Inferior</b>	33,5	34,5	35	43,5	37,5	39,5	47,5
<b>Derecha</b>	33,5	34	36,5	40,5	41,5	45	49
<b>Izquierda</b>	33,5	34,5	36	39,5	41	45	49
<b>Ambiente en la capa superior</b>	32,9	33,8	35,4	36,3	37,6	39	42,5

Para la prueba N° 2 se tomaron las medidas de temperatura promedio en las distintas capas del grano de arroz. Las medidas efectuadas dieron como resultado las variaciones de temperaturas mostradas en la figura 5.2.

TEMPERATURA DE LAS CAPAS DE GRANO Vs TIEMPO DE SECADO

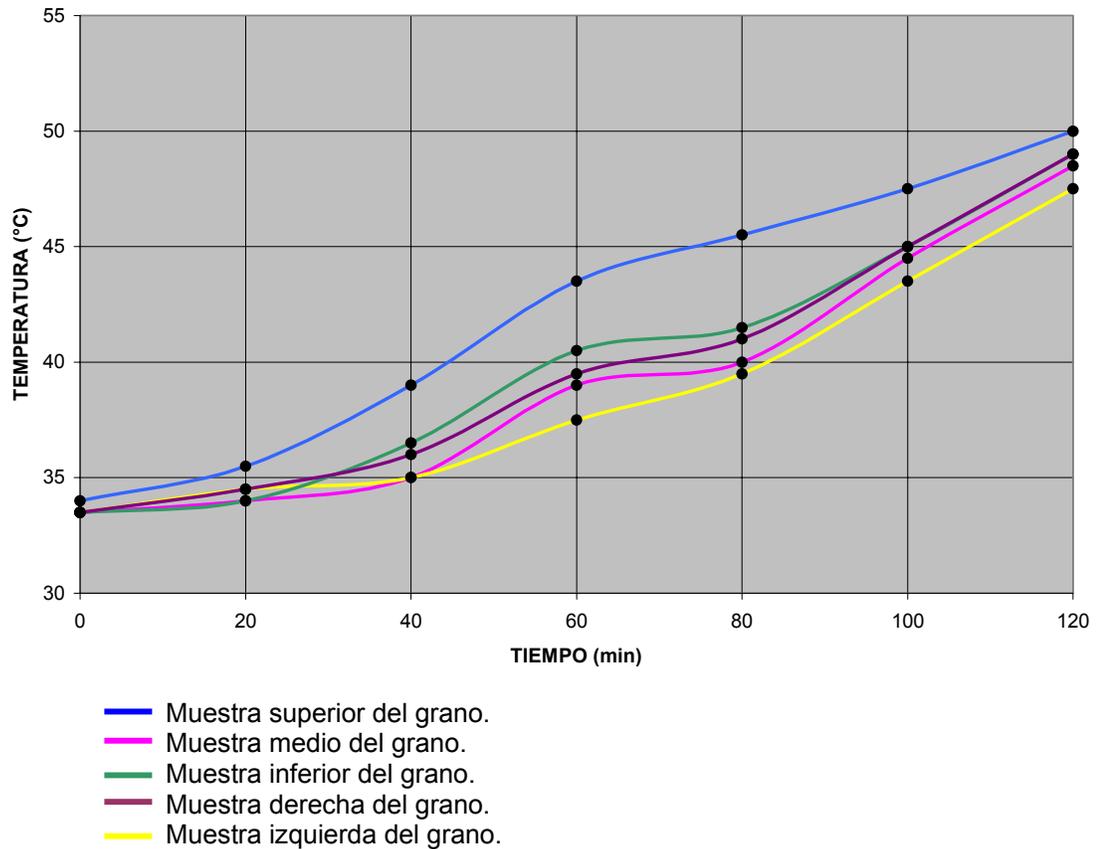


Figura 5.2. Temperatura del grano Vs tiempo de secado para la prueba N° 2

Después de realizar la prueba N°2 de la planta piloto, se observa el comportamiento de la temperatura de acuerdo a las ubicaciones de las muestras de grano de arroz con la capacidad de operación diseñada (50Kg) para la planta, donde los deltas de temperaturas más significativos se presentan en el período comprendido entre los 40 y 80 minutos de iniciado el proceso, debido principalmente a la forma como es inyectado el aire a la planta y a la disposición inclinada del arroz en la alberca. De manera que los granos de la capa superior se encontrarán prácticamente; desde el inicio hasta la finalización del proceso, a

mayor temperatura que cualquiera de las otras muestras, debido a que la capa es menos profunda y además el recorrido que debe realizar el flujo del aire caliente es menor en esta ubicación.

Por otra parte, los deltas de temperaturas experimentadas por dichas capas tienden a disminuir su valor a partir de aproximadamente el 67% del tiempo total de la prueba, debido al equilibrio entre la temperatura máxima que puede entregar el sistema y las distintas muestras de arroz.

De acuerdo a este comportamiento se puede establecer que el grano ubicado en la parte superior de la alberca tendrá un proceso de secado más acelerado que la muestra ubicada en cualquier otra parte de la alberca.

**5.1.2.1 Equipos utilizados** Para la realización de esta prueba se utilizaron dos instrumentos de medida:

ض Un anemómetro y termómetro digital DCFM 8906 para la medición del flujo de aire y su respectiva temperatura.

ض Un termómetro infrarrojo Thh-500 Infrarrojo Greenlee para la medición de la temperatura del grano.

## **5.2 Pruebas del sensor de humedad**

Con el fin de obtener valores reales, al momento de emplear el medidor de humedad diseñado, se hace necesario calibrarlo mediante un medidor patrón. En este caso el medidor patrón utilizado es el equipo Motomco 919 aprobado por la USDA y ampliamente utilizado en la industria arrocera colombiana.

Se desarrollaron varias pruebas que permitieran relacionar los valores de humedad proporcionados por el Motomco, con el propósito de realizar una calibración apropiada. Dichas pruebas se llevaron a cabo bajo distintas condiciones de operación de manera que se lograra establecer los rangos de repetibilidad y exactitud de la medición.

**5.2.1 Pruebas realizadas en campo para la calibración del medidor** Una de las condiciones de gran importancia, bajo las cuales se debía calibrar el equipo medidor de humedad, correspondía a los factores típicos que se presentan al momento de realizar el proceso de secado en campo, razón por la cual se llevaron a cabo un grupo de pruebas en las albercas de la Agroindustria arrocera los Tamacos. Las pruebas realizadas en campo se clasificaron dependiendo del material con que se construyó el elemento primario y del modo de medición utilizado. Según lo anterior podemos clasificar las pruebas realizadas en:

- Dos pruebas realizadas con electrodos de acero.

Una en modo de medición 1

Una en modo de medición 2

➤ Dos pruebas realizadas con electrodos de bronce.

Una en modo de medición 1

Una en modo de medición 2

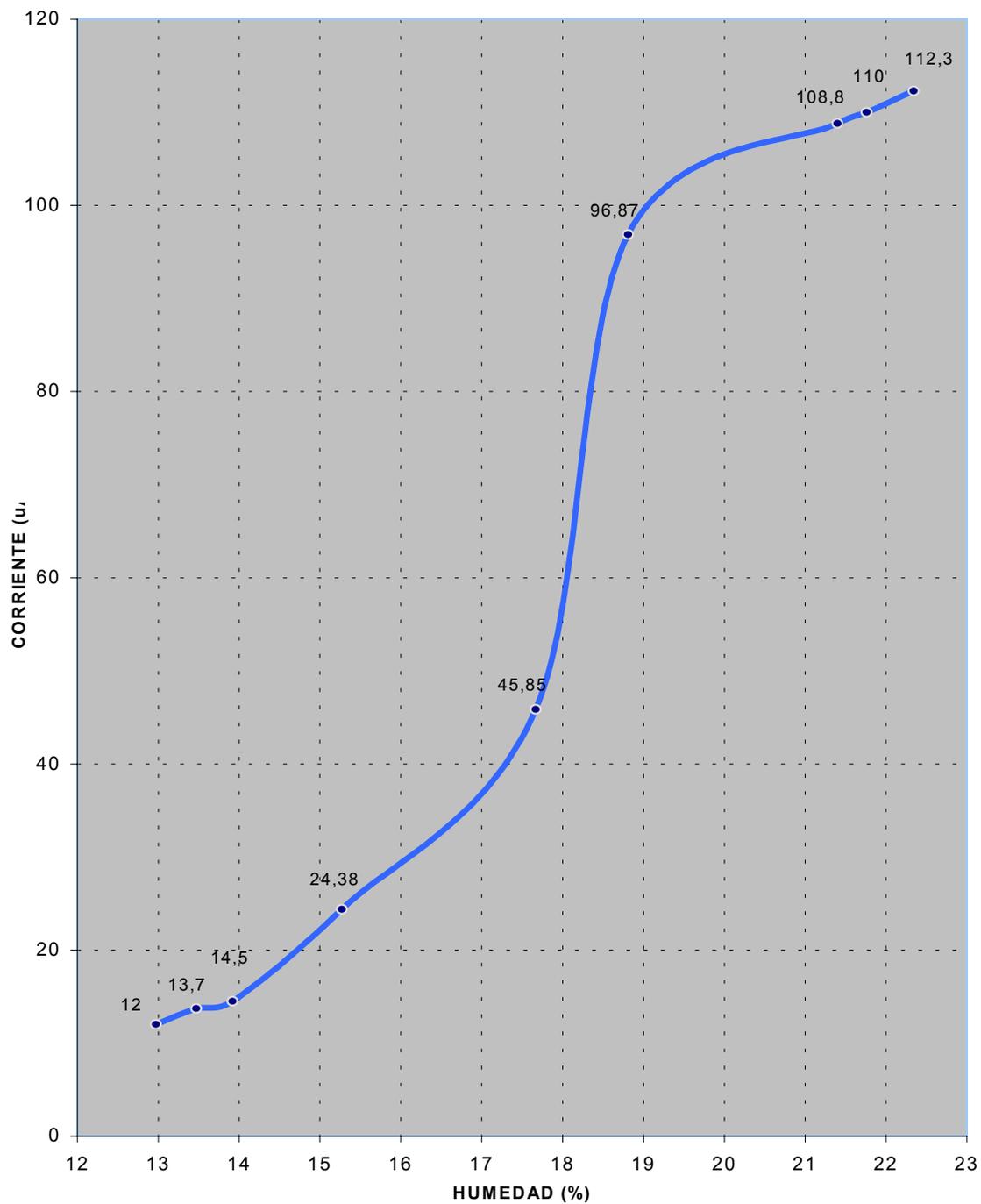
El equipo utilizado para efectuar la medida de la corriente fue el multímetro Fluke Model 187 cuyas especificaciones se encuentran en el anexo D.

**5.2.1.1 Pruebas realizadas con electrodos de acero** Una de las dos pruebas llevadas a cabo con los electrodos de acero se realizaron bajo el modo de medición 1 y la otra bajo el modo de medición 2, obteniendo los resultados mostrados en los siguientes cuadros.

**Cuadro 5.6. Calibración en línea del medidor utilizando electrodos de acero**

Prueba N°	Medidor patrón Humedad (%)	Modo de Medición 1 Humedad ( $\mu\text{A}$ )	Modo de Medición 2 Humedad ( $\mu\text{A}$ )	Temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ )
1	22.34	112.3	33.8	33.5
2	21.76	110	30.4	34
3	21.4	108.8	27	34
4	18.81	96.87	18.61	34
5	17.67	45.85	5.22	35
6	15.27	24.38	0.83	35
7	13.92	14.5	0.31	35
8	13.47	13.7	0.25	35
9	12.97	12	0.19	35

### Curva característica de humedad Vs corriente



**Figura 5.3. Curva característica de humedad Vs corriente para la calibración en línea con el electrodo de acero en modo de medición 1**

### Curva característica de humedad Vs corriente

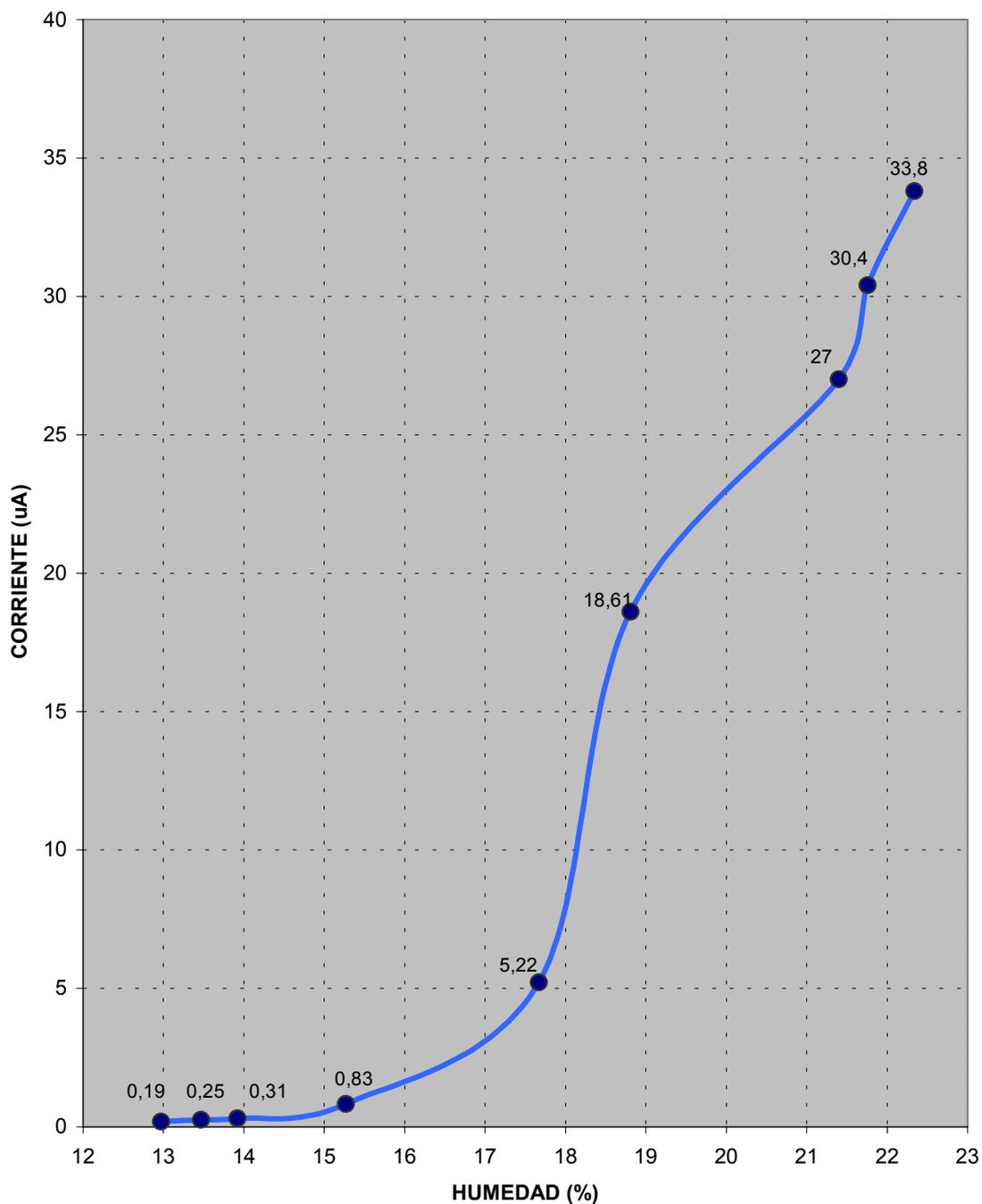


Figura 5.4. Curva característica de humedad Vs corriente para la calibración en línea con el electrodo de acero en modo de medición 2

Mediante la calibración del medidor con los electrodos de acero se obtuvo para el modo de medición 1, una curva que se puede segmentar en tres regiones con sus correspondientes características, dichas regiones corresponden a:

ض Región inicial de humedad: Esta región se encuentra comprendida entre el 12,9% y 17.5% de humedad y su correspondiente rango de corriente entre 11  $\mu\text{A}$  y 45.5 $\mu\text{A}$ . Dicha región, se caracteriza por presentar variaciones de corrientes aproximadamente lineales de acuerdo a las variaciones del porcentaje de humedad. En general, los rangos de variaciones ( $\mu\text{A}/\%$ humedad) para esta región son apropiados para realizar una medición de porcentajes de sus correspondientes porcentajes de humedad con una buena precisión.

➤ Región intermedia de humedad: Esta región está comprendida entre el 17.5% y 19% de humedad y su correspondiente rango de corriente entre 45.5 $\mu\text{A}$  y 99.5 $\mu\text{A}$ . En esta región se presentan grandes variaciones en valores de corriente ante pequeñas variaciones de humedad, lo que hace de esta región más sensible y exacta, pero a su vez más susceptible a proporcionar valores errados de humedad cuando se presenta una mínima variación en las condiciones de la muestra, tales como cambio de la presión ejercida a los electrodos, y forma de inserción del mismo.

➤ Región final de humedad: Esta región inicia desde el 19% de humedad y su valor mínimo de corriente correspondiente de  $99.5\mu\text{A}$ . Esta región presenta un comportamiento muy semejante a la región inicial de humedad y presenta, por tal motivo características de precisión muy similares.

Por su parte, para el modo de medición 2, se obtuvo una curva que se puede segmentar igualmente en tres regiones marcadas de acuerdo a su relación corriente-porcentaje de humedad.

➤ Región inicial de humedad: Esta región, a diferencia del modo de medición anterior, presenta rangos de valores entre 12,9% y 15.5% de humedad con sus correspondientes valores de corriente entre  $0.19\mu\text{A}$  y  $1\mu\text{A}$ , causando una disminución en el valor de la pendiente de la curva en este modo de medición, por lo tanto, para la región inicial de humedad se tienen variaciones de corriente muy pequeñas para diferencias de porcentajes de humedad relativamente significativos, de manera que en esta zona la precisión baja con respecto a la región del modo de medición 1.

➤ Región intermedia de humedad: Esta región esta comprendida entre los valores de 15.5% y 18.81% de humedad y su valor mínimo y máximo de corriente correspondientes a  $1\mu\text{A}$  y  $18.61\mu\text{A}$ . En esta región, al igual que para la curva

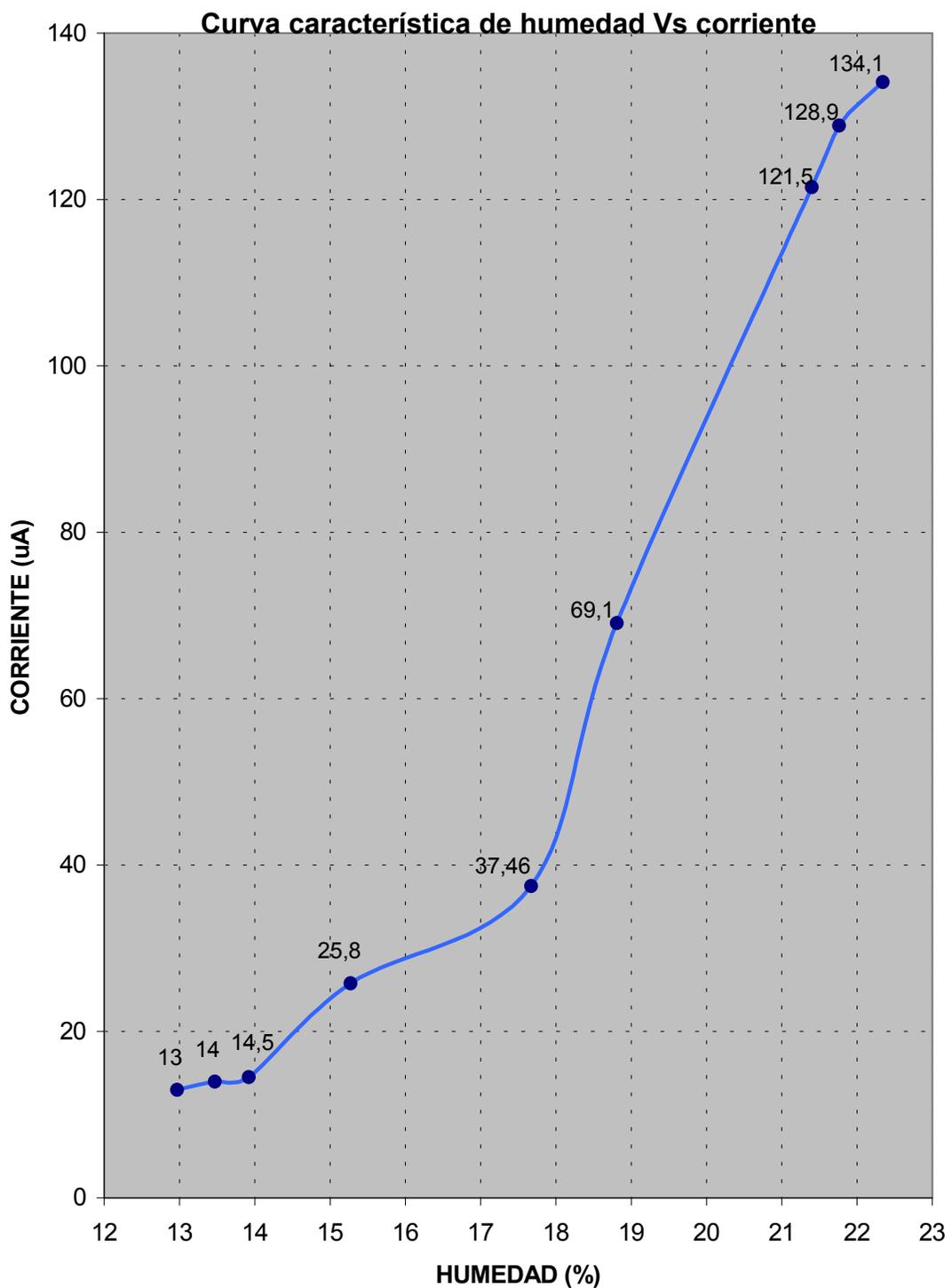
anterior, la variación de corriente es alta en comparación con los cambios mínimos de humedad que se presentan en esta etapa o región.

➤ Región final de humedad: Para esta región contamos con valores de humedad que van desde 18.81% de humedad en adelante. Esta última curva carece de una variación proporcional ante diferentes valores de humedad.

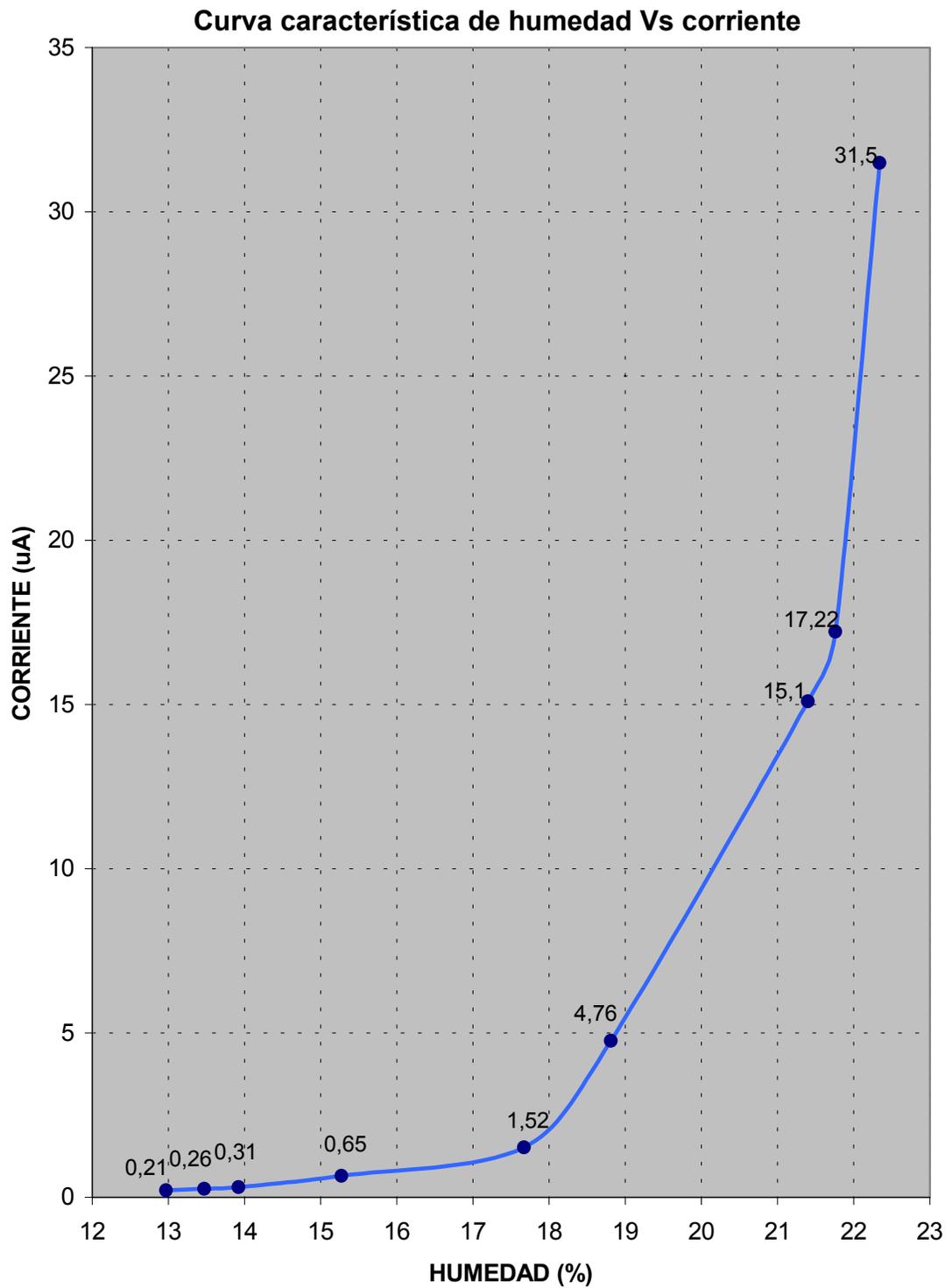
**5.2.1.2 Pruebas realizadas con electrodos de bronce** Al igual que con los electrodos de acero, para los electrodos de bronce se realizaron dos de las cuatro pruebas bajo el modo de medición 1 y las dos restantes bajo el modo de medición 2. Los resultados de estas pruebas se muestran en los cuadros que se muestran a continuación.

**Cuadro 5.7. Calibración en línea del medidor utilizando electrodos de bronce**

Prueba N°	Medidor patrón Humedad (%)	Modo de Medición 1 Humedad (μA)	Modo de Medición 2 Humedad (μA)	Temperatura (°C)
1	22.34	134.1	31.50	30
2	21.76	128.9	17.22	32
3	21.4	121.5	15.10	32
4	18.81	69.1	4.76	32
5	17.67	37.46	1.52	34
6	15.27	25.8	0.65	34
7	13.92	14.5	0.31	35
8	13.47	14.0	0.26	35
9	12.97	13.0	0.21	35



**Figura 5.5. Curva característica de humedad Vs corriente para la calibración en línea con el electrodo de bronce en modo de medición 1**



**Figura 5.6. Curva característica de humedad Vs corriente para la calibración en línea con el electrodo de bronce en modo de medición 2**

Mediante la calibración del medidor con los electrodos de bronce se obtuvo, para el modo de medición 1, una curva que se puede dividir en tres regiones, las cuales presentan características distintas en cada una de las regiones.

➤ Región inicial de humedad: Esta región se encuentra comprendida, para este modo de medición, entre el 12.9% y 13.92% de humedad con su correspondiente rango de corriente entre 13  $\mu\text{A}$  y 14.5 $\mu\text{A}$ . En esta región encontramos variaciones de corrientes caracterizadas por ser aproximadamente lineales de acuerdo a las variaciones del porcentaje de humedad.

➤ Región intermedia de humedad: Esta región está comprendida entre el 13.92% y 17.67% de humedad y su correspondiente rango de corriente entre 14.5 $\mu\text{A}$  y 37.5 $\mu\text{A}$ . En esta región se presentan variaciones más significativas en valores de corriente ante pequeñas variaciones de humedad, lo que hace de esta región más sensible y exacta en comparación con la región inicial. En general, los rangos de variaciones ( $\mu\text{A}/\%$ humedad) en esta región son más adecuados para efectuar mediciones de porcentajes humedad con una buena precisión.

➤ Región final de humedad: Esta región inicia desde el 17.67% de humedad y su valor mínimo de corriente corresponde a 37.46 $\mu\text{A}$ . Esta región presenta un comportamiento muy semejante a la región intermedia de humedad, aunque muestra variaciones de corriente mayores y a su vez más lineales.

Del mismo modo que en el modo de medición 1, se obtuvieron tres regiones:

- Región inicial de humedad: En esta región encontramos los rangos de humedad entre el 12.9% y 17.67% de humedad, donde su correspondiente rango de corriente se encuentra entre  $0.21\mu\text{A}$  y  $1.52\mu\text{A}$ . En esta región encontramos variaciones de corrientes caracterizadas por ser aproximadamente lineales de acuerdo a las variaciones del porcentaje de humedad, además de ser variaciones relativamente pequeñas.
  
- Región intermedia de humedad: Esta región está comprendida entre el 17.67% y 21.6% de humedad y su correspondiente rango de corriente entre  $1.52\mu\text{A}$  y  $17\mu\text{A}$ . En general, los rangos de variaciones ( $\mu\text{A}/\%$ humedad) en esta región son los más adecuados para efectuar mediciones de porcentajes humedad con una buena precisión.
  
- Región final de humedad: Esta región inicia desde el 21.6% de humedad y su valor mínimo de corriente correspondiente de  $17\mu\text{A}$ . En esta región se presentan grandes variaciones de corriente ante pequeñas variaciones de humedad, lo que hace de esta región más sensible en comparación con las demás regiones.

### **5.2.2 Pruebas realizadas en el laboratorio para la calibración del medidor**

Con el fin de realizar un análisis y la respectiva corrección del valor de humedad, de acuerdo a la temperatura del grano de arroz, se llevaron a cabo una serie de mediciones del contenido de humedad del arroz a temperatura ambiente. Las pruebas realizadas se efectuaron con el mismo medidor patrón utilizado para las pruebas en campo, e igualmente se clasificaron dependiendo del material con que se construyó el elemento primario y del modo de medición utilizado. Según lo anterior, podemos clasificar las pruebas realizadas en:

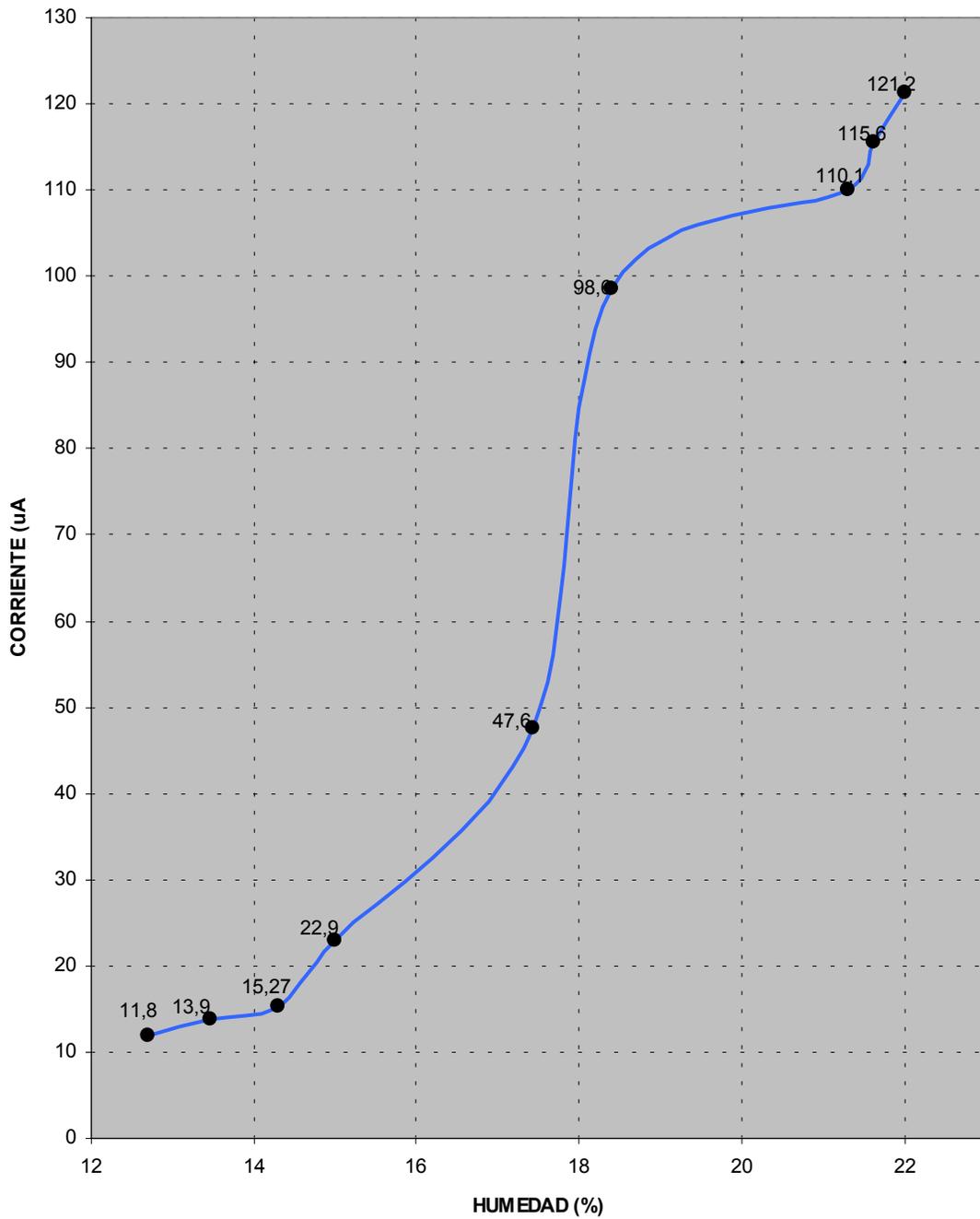
- Dos pruebas realizadas con electrodos de acero.
  - Una en modo de medición 1
  - Una en modo de medición 2
- Dos pruebas realizadas con electrodos de bronce.
  - Una en modo de medición 1
  - Una en modo de medición 2

**5.2.2.1 Pruebas realizadas con electrodos de acero** Una de las dos pruebas llevadas a cabo con los electrodos de acero se realizó bajo el modo de medición 1 y la otra bajo el modo de medición 2, obteniendo los resultados mostrados en los siguientes cuadros.

**Cuadro 5.8. Calibración en el laboratorio del medidor utilizando electrodos de acero**

Prueba N°	Medidor patrón Humedad (%)	Modo de Medición 1 Humedad ( $\mu\text{A}$ )	Modo de Medición 2 Humedad ( $\mu\text{A}$ )	Temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ )
1	22	121.2	39.5	31
2	21.63	115.6	35	31
3	21.3	110.1	33.8	31
4	18.4	98.6	24.65	31
5	17.43	47.6	5.9	31
6	15	22.9	0.94	31
7	14.3	15.27	0.34	31
8	13.47	13.9	0.27	31
9	12.7	11.8	0.18	31

### Curva característica de humedad Vs corriente



**Figura 5.7. Curva característica de humedad Vs corriente para la calibración en el laboratorio con el electrodo de acero en modo de medición 1**

Curva característica de humedad Vs corriente

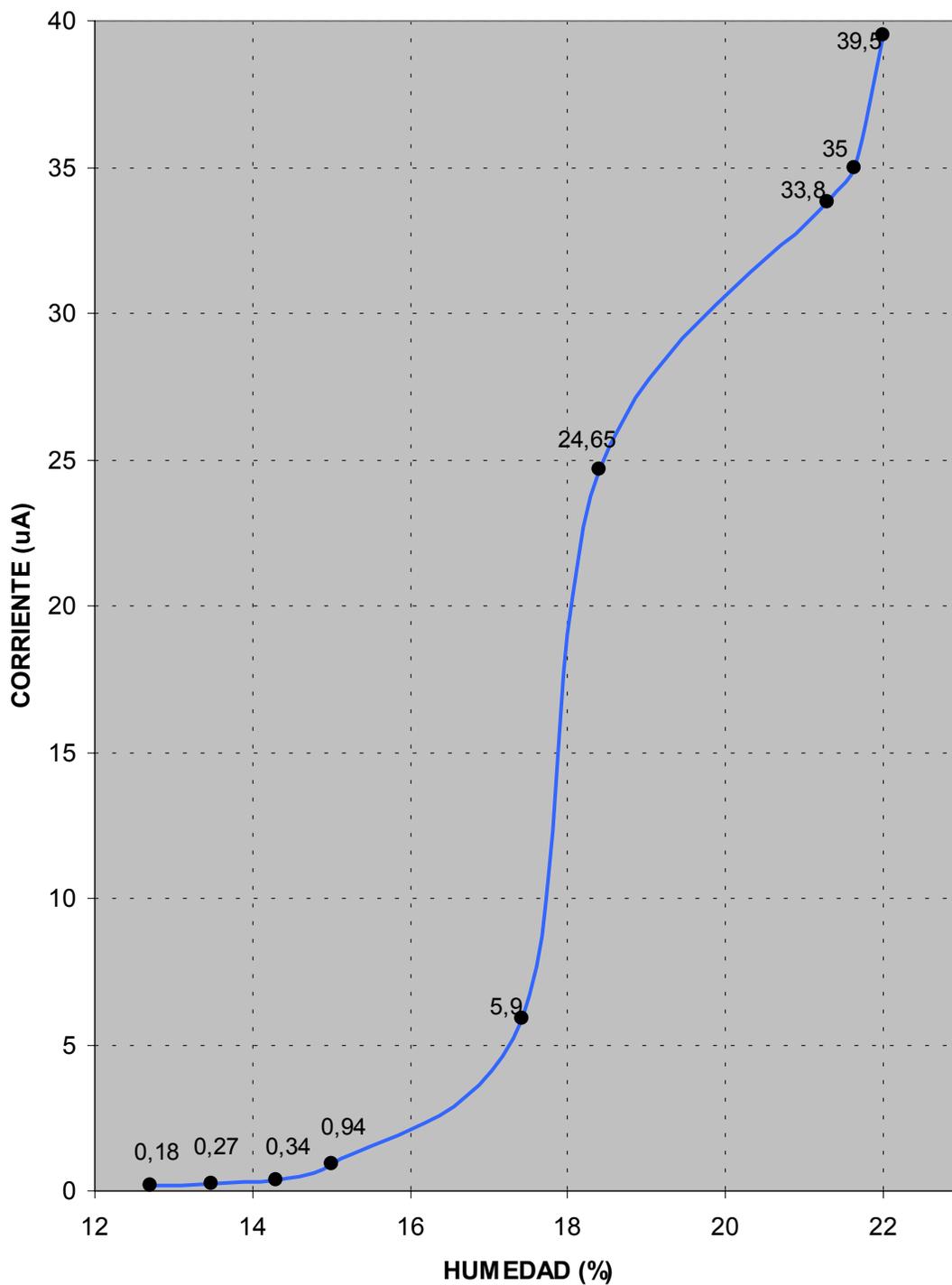


Figura 5.8. Curva característica de humedad Vs corriente para la calibración en el laboratorio con el electrodo de acero en modo de medición 2

**5.2.2.2 Pruebas realizadas con electrodos de bronce** Al igual que con los electrodos de acero, para lo electrodos de bronce se realizaron una de las dos pruebas bajo el modo de medición 1 y la restante bajo el modo de medición 2. Los resultados de estas pruebas se muestran en los cuadros que se observan a continuación.

**Cuadro 5.9. Calibración en el laboratorio del medidor utilizando electrodos de bronce**

Prueba N°	Medidor patrón Humedad (%)	Modo de Medición 1 Humedad ( $\mu\text{A}$ )	Modo de Medición 2 Humedad ( $\mu\text{A}$ )	Temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ )
1	22.50	146.6	35.0	31
2	21.63	129.7	18.4	31
3	21.10	126.6	15.3	31
4	18.70	69.4	4.67	31
5	17.3	37.8	1.54	31
6	15.0	24.0	0.79	31
7	14.08	16.0	0.34	31
8	13.47	14.8	0.29	31
9	12.80	13.5	0.23	31

### Curva característica de humedad Vs corriente

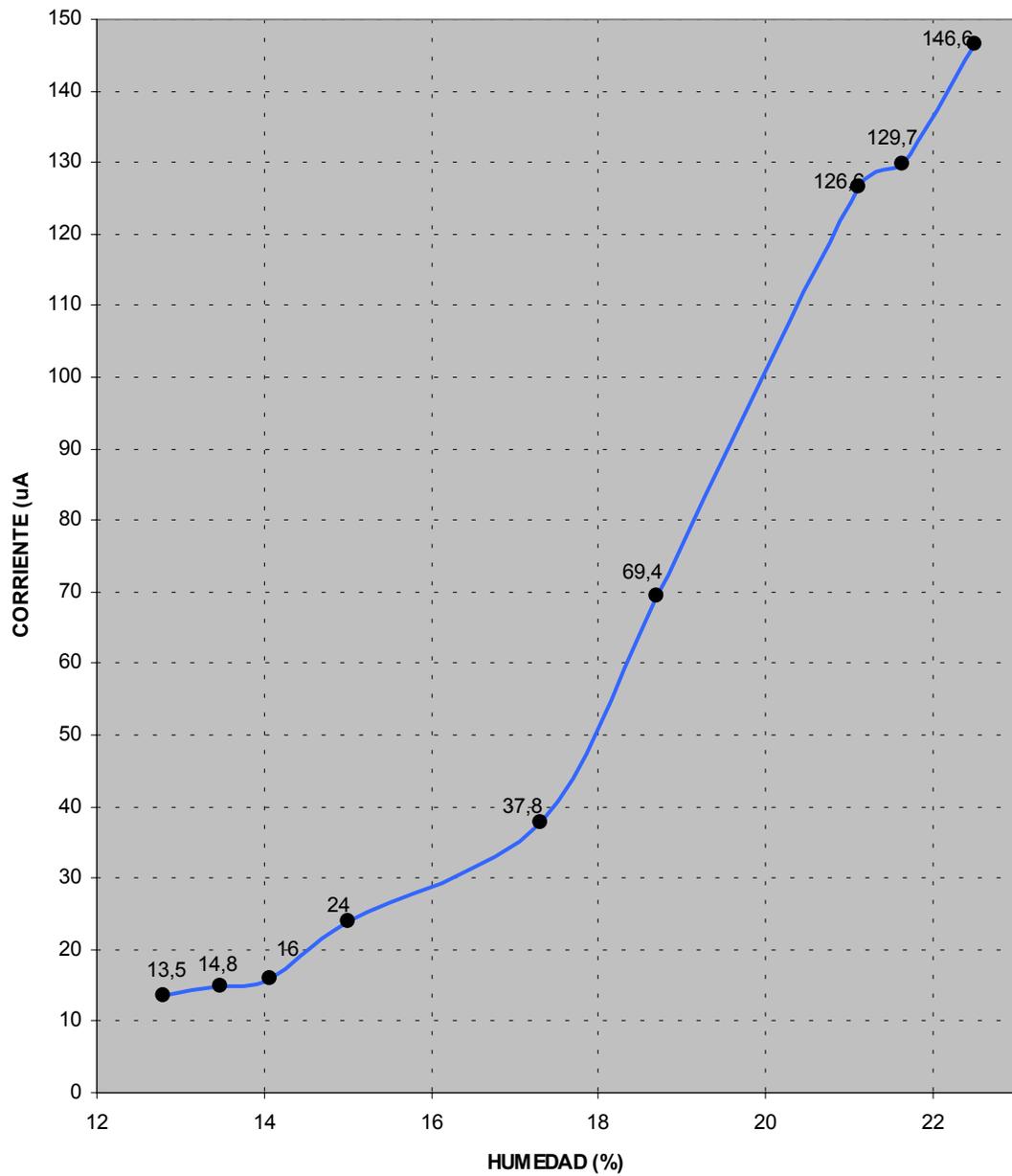
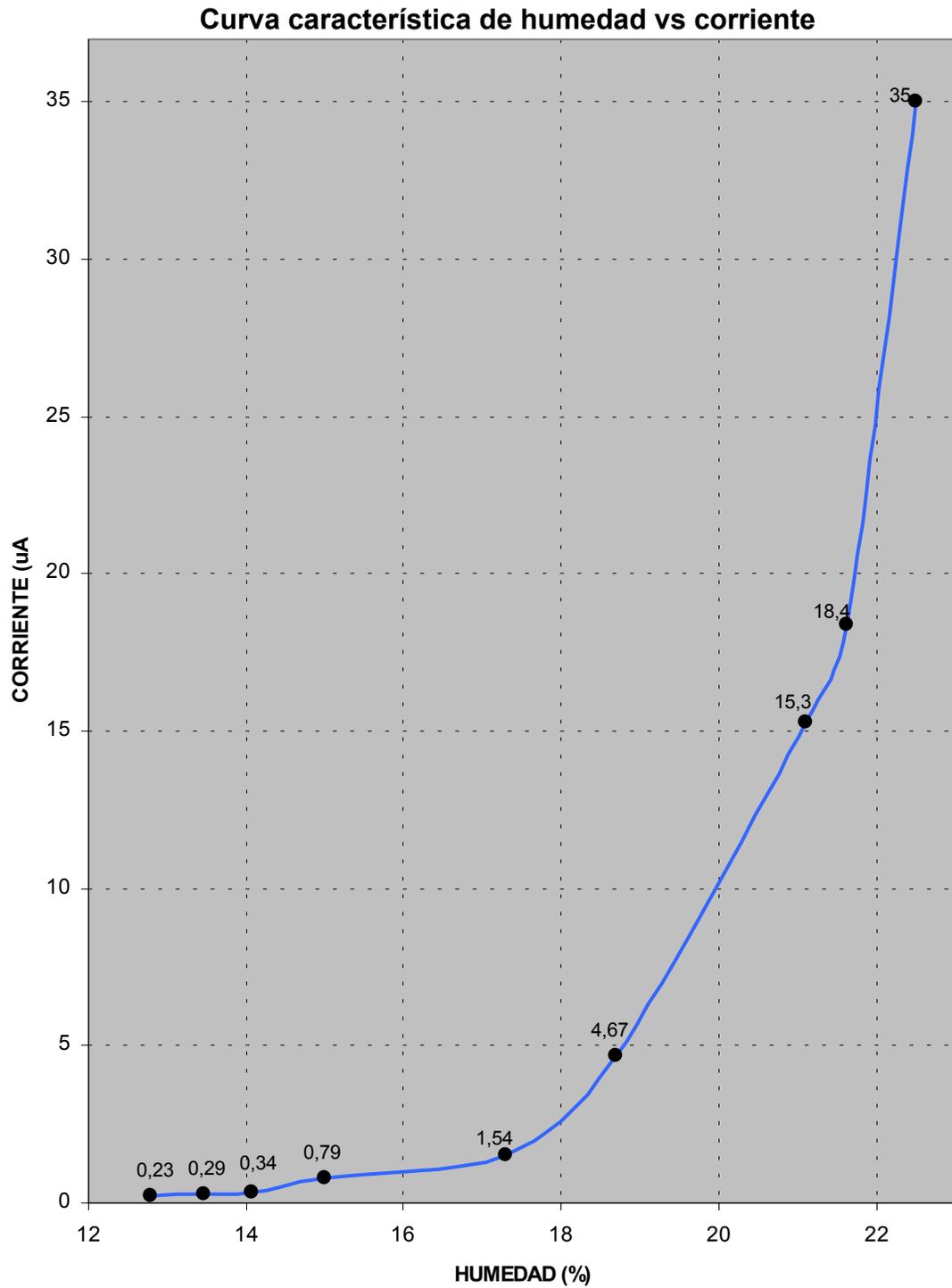
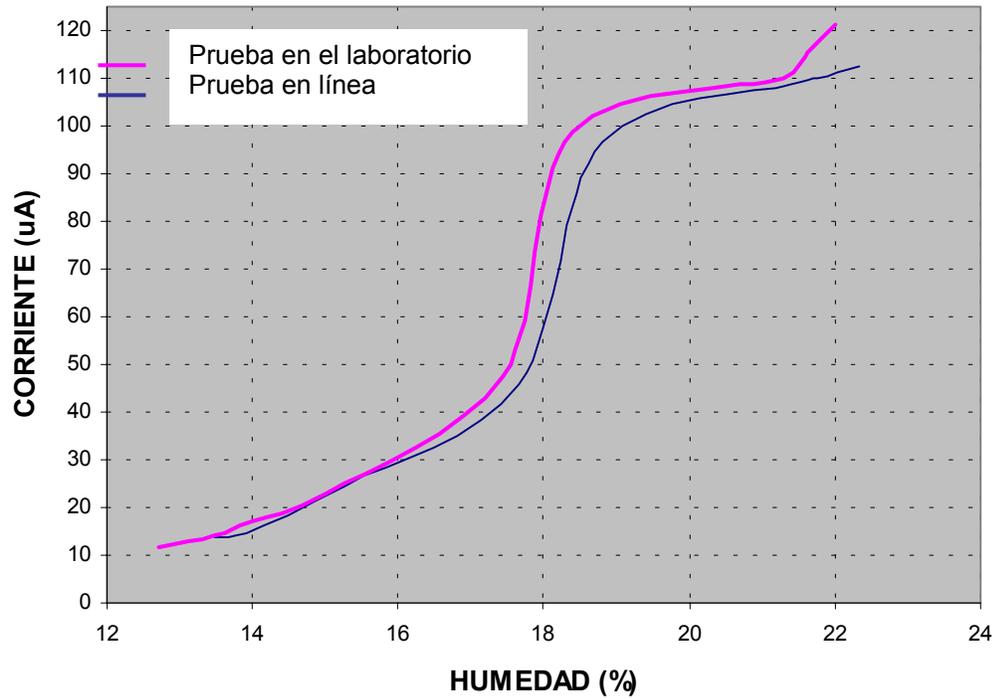


Figura 5.9. Curva característica de humedad Vs corriente para la calibración en el laboratorio con el electrodo de bronce en modo de medición 1



**Figura 5.10. Curva característica de humedad Vs corriente para la calibración en el laboratorio con el electrodo de bronce en modo de medición 2**

Con el fin de analizar las diferencias tanto para la calibración realizada en línea como la realizada en el laboratorio, se muestra las siguientes graficas:



**Figura 5.11. Comparación de calibraciones para el acero en modo de medición 1**

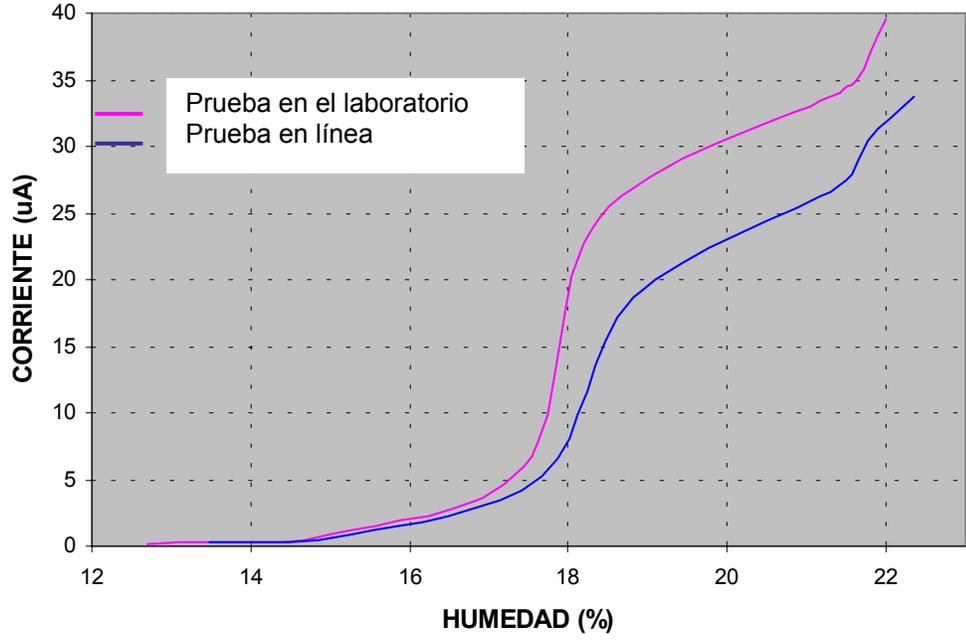


Figura 5.12. Comparación de calibraciones para el acero en modo de medición 2

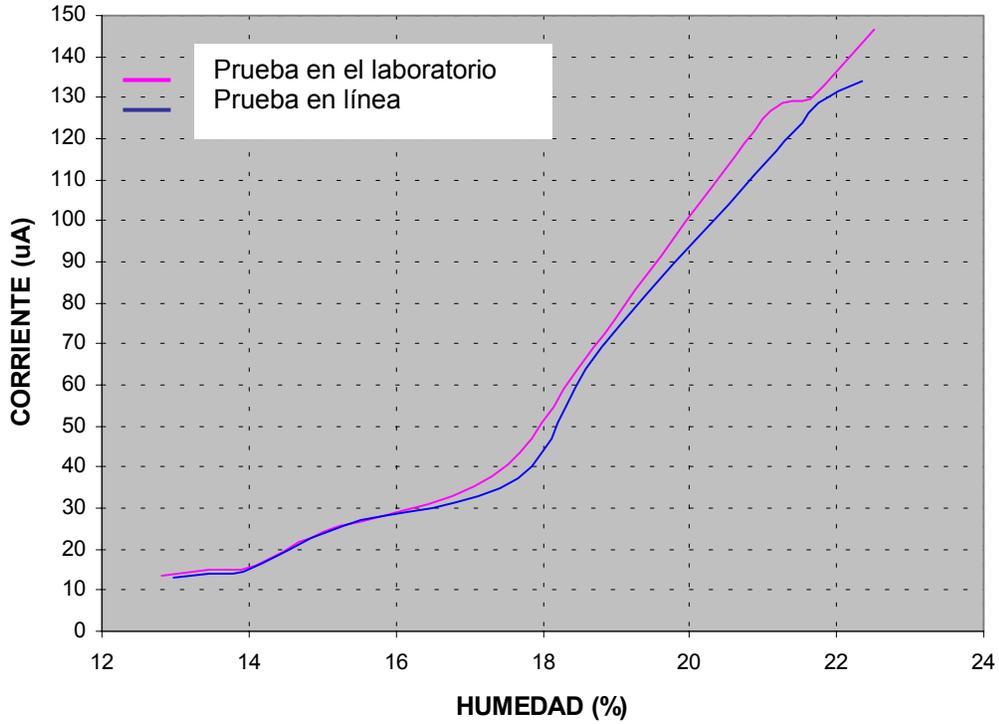
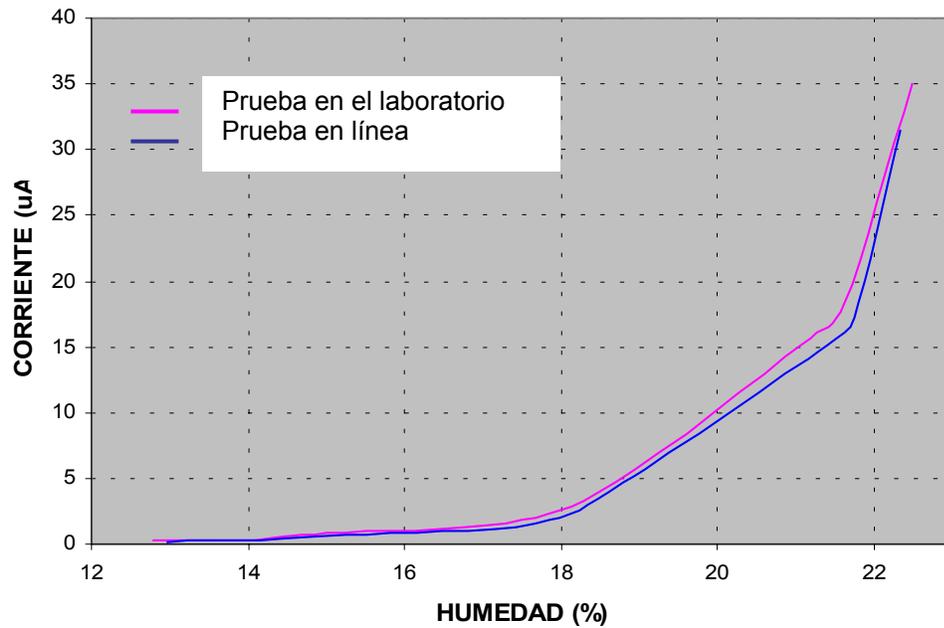


Figura 5.13. Comparación de calibraciones para el bronce en modo de medición 1



**Figura 5.14. Comparación de calibraciones para el bronce en modo de medición 2**

A través de las comparaciones mostradas en las figuras que representan las curvas de calibración, se logra observar el efecto de la temperatura sobre el valor de humedad. Este fenómeno tiende a disminuir la lectura de corriente del medidor para un porcentaje determinado de humedad, y por lo tanto entrega valores de humedad menores.

De acuerdo a las calibraciones realizadas en los distintos modos de medición, se presenta la tabla de conversión (cuadro 5.10.) de corriente a porcentaje de humedad para cada tipo de electrodo y cada modo de medición.

**Cuadro 5.10. Tabla de conversión de corriente a porcentaje de humedad**

<b>HUMEDAD (%)</b>	<b>Acero M1</b>	<b>Acero M2</b>	<b>Bronce M1</b>	<b>Bronce M2</b>
12.50	10.4	0.13	12.1	0.17
12.75	11.2	0.16	12.6	0.20
13.00	12.0	0.19	13.1	0.23
13.25	12.9	0.22	13.6	0.26
13.50	13.7	0.24	14.0	0.27
13.75	14.1	0.27	14.3	0.29
14.00	15.0	0.33	15.7	0.32
14.25	16.7	0.43	17.0	0.39
14.50	18.5	0.53	19.1	0.44
14.75	20.4	0.62	21.2	0.50
15.00	22.2	0.72	23.4	0.57
15.25	24.2	0.82	25.6	0.63
15.50	26.2	1.17	26.8	0.72
15.75	28.2	1.60	27.9	0.80
16.00	30.4	2.00	29.1	0.89
16.25	32.5	2.40	30.3	0.98
16.50	34.6	2.92	31.5	1.06
16.75	37.0	3.37	32.7	1.16
17.00	39.3	3.88	34.0	1.25
17.25	41.7	4.47	35.2	1.35
17.50	44.1	4.85	36.5	1.45
17.75	49.2	6.10	39.5	1.73
18.00	60.0	8.92	46.2	2.41
18.25	71.2	11.80	53.1	3.11
18.50	82.4	14.80	60.1	3.83
18.75	94.0	17.85	67.3	4.57
19.00	97.6	19.10	72.5	5.43
19.25	98.8	19.90	77.2	6.34
19.50	100.0	20.69	82.0	7.27
19.75	101.0	21.50	86.9	8.23
20.00	102.4	22.30	91.8	9.24
20.25	103.4	23.08	96.7	10.20
20.50	104.6	23.90	102.1	11.20
20.75	105.7	24.70	107.3	12.27
21.00	106.8	25.60	112.6	13.35
21.25	108.0	26.40	118.1	14.42
21.50	109.1	27.90	123.5	15.68
21.75	109.9	30.10	128.6	17.16
22.00	110.8	31.85	131.0	23.05
22.25	111.8	33.30	133.3	29.25

Siendo **M1**: Modo de medición 1.

**M2**: modo de medición 2.

Los valores mostrados en el cuadro 5.10 se obtuvieron a partir de la obtención de las ecuaciones características de los datos de calibración mediante el uso de la herramienta Matlab 5.3. y sus respectivos comandos, como se muestra a continuación:

Se introducen los valores obtenidos para cada uno de los dos modos de medición y cada uno de los electrodos (bronce y acero), de la siguiente manera:

$X=[22.34 \ 21.76 \ 21.4 \ 18.81 \ 17.67 \ 15.27 \ 13.92 \ 13.47 \ 12.97];$

$Y=[112.3 \ 110 \ 108.8 \ 96.87 \ 45.85 \ 24.38 \ 14.5 \ 13.7 \ 12];$

Los valores de “X”, corresponden a los valores en porcentajes de humedad obtenidos con el medidor Motomco 919. Mientras los valores de “Y”, corresponden a los valores respectivos de corriente entregados por el medidor.

*figure (1);*

*plot(X,Y);*

Se realiza la gráfica característica de los datos de entrada.

$X1=[X(1) \ X(2) \ X(3)];$

```
Y1=[Y(1) Y(2) Y(3)];
```

Luego, se toman los puntos que se encuentran más continuos para cada una de las tablas, de manera que los valores de la tabla de conversión que se obtengan, presenten la menor desviación posible.

```
Ec=polyfit(X1, Y1, 2);
```

Mediante este comando se obtienen los coeficientes para una ecuación polinómica que cumpla con los datos de entrada “X1” y “Y1”.

```
Xn=[Xn(1) Xn(2) Xn(3) Xn(N)];
```

```
Y2=Ec(1,1). *X. *X+Ec(1,2)*X+Ec(1,3);
```

En la matriz Xn se suministrarán los valores de humedad a los cuales se le desea conocer su correspondiente valor de corriente. De manera que la matriz Y2 tendrá los valores correspondientes de corriente para cada uno de los datos de humedad Xn.

*figure (2)*

```
plot (Xn, Y2) ;
```

Se realiza la gráfica que una a los nuevos puntos con sus respectivos valores de corriente.

Las ecuaciones correspondientes a cada tramo y su respectivo modo de medición se muestran en los cuadros 5.11. y 5.12. Cabe anotar, que las ecuaciones obtenidas para cada tramo no corresponden a la verdadera característica en general de la relación entre humedad y corriente. La verdadera relación o comportamiento entre el porcentaje de humedad del grano y la corriente que proporciona el medidor se muestra a través de la mejor ecuación de la tabla de conversión.

**Cuadro 5.11. Tabla de ecuaciones en el modo de medición 1**

MODO DE MEDICIÓN 1	ACERO		BRONCE
	Rango de humedad	Ecuación de la forma $Y=aX^2+bX+c$	Ecuación de la forma $Y=aX^2+bX+c$
	12.5-13.25	$0.1837 - 1.4577$	$0.0741 + 0.417$
13.25-13.75	$0.0546 - 0.251$	$0.0052 + 0.9699$	
13.75-15.25	$0.4111 - 4.6803$	$0.4799 - 5.6391$	
15.25-17.50	$0.4159 - 4.7544$	$0.1793 - 1.0488$	
17.50-18.75	$2.2413 - 37$	$1.3628 - 21.9608$	
18.75-21.25	$-0.0254 + 5.627$	$0.7731 - 10.8805$	
21.25-21.75	$-0.08 + 6.8$	$0.6837 - 8.9543$	
21.75-22.25	$0.0488 + 6.1165$	$0.1362 + 2.9609$	

**Cuadro 5.12. Tabla de ecuaciones en el modo de medición 2**

<b>MODO DE MEDICIÓN 2</b>	<b>ACERO</b>		<b>BRONCE</b>
	<b>Rango de humedad</b>	<b>Ecuación de la forma <math>Y=aX^2+bX+c</math></b>	<b>Ecuación de la forma <math>Y=aX^2+bX+c</math></b>
	12.5-13.25	0.0 078 – 0.0868	0.0076 – 0.0807
	13.25-13.75	0.0082 – 0.0925	0.0066 – 0.0695
	13.75-15.25	0.0238 – 0.3086	0.0150 – 0.1870
	15.25-17.50	0.1004 – 1.4794	0.0181 – 0.2339
	17.50-18.75	0.6087 – 10.468	0.1465 – 2.5030
	18.75-21.25	0.1051 – 0.9833	0.1747 – 3.0336
	21.25-21.75	0.376 – 6.7856	0.2382 – 4.3919
	21.75-22.25	0.19999 – 2.952	1.0667 – 22.4193

Para los electrodos de acero inoxidable en el modo de medición 1, la ecuación de la mejor curva es:

$$a = 4.82$$

$$b = 3.3$$

$$y = a + b \cdot \ln(x)$$

$$y = 4.82 + 3.3 \ln(x)$$

$$y = 4.82 + 1.43 \log(x)$$

Para el modo de medición 2, su ecuación será:

$$a = 15.28$$

$$b = 1.29$$

$$y = a + b \cdot \ln(x)$$

$$y = 15.28 + 1.29 \ln(x)$$

$$y = 15.28 + 0.5608 \log(x)$$

Para los electrodos de bronce obtenemos:

$$a = 3.4$$

$$b = 3.8$$

$$y = a + b \cdot \ln(x)$$

$$y = 3.4 + 3.8 \ln(x)$$

$$y = 3.4 + 1.65 \log(x)$$

Para el modo de medición dos le corresponderían:

$$a = 16.18$$

$$b = 2.2$$

$$y = a + b \cdot \ln(x)$$

$$y = 16.18 + 2.2 \ln(x)$$

$$y = 15.88 + 0.95 \log(x)$$

## 6. CONCLUSIONES

El presente proyecto, se basó principalmente en el desarrollo investigativo del proceso de secado de arroz, los diferentes métodos para la medición de la humedad en dicho proceso y la aplicación de cada uno de estos tópicos en la implementación del prototipo.

Mediante el desarrollo investigativo y aplicación del prototipo se pudo establecer que:

- El medidor de humedad implementado es práctico, económico y es el ideal para realizar mediciones en línea, debido a la facilidad que presenta para adecuar sus electrodos a las condiciones del proceso de secado de arroz, de manera que sean fácil de manipular y disponer dentro de la muestra contenida en la alberca donde se lleva a cabo dicho proceso. Su practicidad se debe en gran parte al método de medición de humedad empleado (resistivo).
- A diferencia de los medidores de humedad más comunes, a través del medidor implementado, se obtiene una lectura inmediata del contenido de humedad del grano, sin necesidad de realizar acondicionamientos previos a la medición de la humedad, como la aireación del grano.

- El prototipo de medición del contenido de humedad es un dispositivo que permite la fácil implementación de tareas de monitoreo y control por computador, debido al tipo de salida (corriente) que proporciona y al método de medición que emplea.
  
- El circuito medidor de humedad empleado, debido a la utilización de los circuitos de calibración, presenta la ventaja de ser un instrumento fácil de adaptar ante condiciones variantes, tales como en los casos donde se requiere la medición de humedad en capas más profundas y utilización de electrodos de mayor longitud, recomendando en dichos casos mantener una relación de “longitud electrodo-diámetro base de la muestra” en un rango práctico.
  
- Los electrodos, al exponerse a altas temperaturas (rango entre 40°C y 50°C), presentan un calentamiento progresivo (propio de todo elemento metálico), que provoca la disminución del valor de corriente en el medidor del contenido de humedad, y por ende, éste entrega un valor de humedad menor al valor real. Sin embargo, los electrodos sólo podrán realizar mediciones correctas de humedad en muestras de granos que se encuentran en dicho rango de temperatura, mientras el tiempo de ejecución de la medición no sea suficiente para alterar la temperatura del material.
  
- El diseño básico del medidor del contenido de humedad no solo entrega resultados bajo las condiciones ofrecidas por la planta piloto, como son la

capacidad de 50Kg y la profundidad de la capa entre 16-20 cm, sino que permite realizar mediciones del contenido de humedad bajo las condiciones reales, considerando que los valores proporcionados serán menos representativos.

➤ Los electrodos contruidos de acero inoxidable presentan mayor facilidad de intrusión en aquellas muestras sometidas a altas presiones producto de la distribución natural de los granos en la alberca, mientras que los electrodos de bronce presentan mayor dificultad debido a que sus propiedades físicas le impiden deslizarse a través del grano.

➤ Las variaciones de presión a la cual está sometida el grano, proporciona cambios en la lectura de corriente, en un porcentaje máximo de aproximadamente  $\pm 12\%$  del valor real para el acero, y  $\pm 16\%$  para el bronce, radicando su diferencia en que la rigidez del bronce es menor que la del acero. Por lo tanto, se recomienda en lo posible, tratar de mantener constante la presión a la cual se encuentran los granos e introducir el electrodo en forma vertical. Sin embargo, para la medida del contenido de humedad en línea (donde los electrodos se mantienen en un mismo punto de la muestra), se logra conservar las condiciones de presión durante la medida, minimizando el efecto de la presión en la medición.

➤ A pesar de las variaciones de humedad presentes en las capas de grano; propias del sistema de secado con aire caliente en albercas, el medidor de humedad proporciona el valor más alto de la muestra que se está analizando,

debido a la disposición de los electrodos; donde todas las resistencias que representan el valor de humedad de las capas de la muestra, se encuentran en paralelo, provocando que la resistencia resultante vista por el electrodo sea menor que cualquiera de las resistencias propias de las capas de grano y además, el valor tanto de la lectura del medidor (en  $\mu\text{A}$ ) como su correspondiente porcentaje de humedad, sean mayores. Por lo tanto, se recomienda que los electrodos se dispongan dentro de la alberca, de tal manera que midan el contenido de humedad del grano en deltas de humedades muy poco significativas.

➤ La escala de modo de medición 1 proporciona valores de corriente mayores que el modo de medición 2, debido a la ganancia de corriente que proporciona la operación del JFET canal N. Sin embargo, para valores de humedad altos, la estabilidad y repetibilidad de los valores para el modo de medida 2 son mejores que para el modo de medición 1.

## BIBLIOGRAFÍA

- **ALIZAGA**, R., Zeledón, M., Jiménez, R., Calibración de un medidor de capacitancia para estimar la humedad.  
[www.asd-cr.com/ASD-Pub/Bol08/B8c2.htm](http://www.asd-cr.com/ASD-Pub/Bol08/B8c2.htm)
- **CASTILLO NIÑO**, Álvaro. Almacenamiento de granos, Colombia, Editorial Ediagro Ltda, 1984.
- **CASTILLO NIÑO**, Álvaro. Manual práctico para el manejo de granos, Colombia, Editorial Ediagro Ltda., 1990.
- **CASTILLO NIÑO**, Álvaro. Rice drying in the tropics of America, Editorial Ediagro Ltda., 2001.  
<http://www.flar.org/RICE%20DRYING%20IN%20LATIN%20AMERICA.doc>
- **DE DIOS** Carlos Alberto, Secado de granos y secadoras.
- **GAVIRIA LONDOÑO**, Jaime. Control de calidad de granos, Colombia, Editorial Ediagro Ltda., 1989.
- **MUTTERS**, R.G. Measurement of Grain Moisture. 1998.  
<http://agronomy.ucdavis.edu/uccerice/QUALITY/moisture.htm>
- **MAQUINARIA SUPERBRIX S.A**, Manual de instrucciones maquinarias SuperBrix S.A.

- **MAQUINARIA SUPERBRIX S.A**, General aspects of rice dryng and storaging.
- **NORMA ISO 711:1985** Para cereales y sus derivados, Determinación del contenido de Humead, método de Referencia Básica
- **NORMA ISO 712:1998** Para cereales y sus derivados, Determinación del contenido de Humead, método de Referencia de Rutina
- **NORMA ISO 7700-1:1984** Para cereales y sus derivados, Verificación de la Calibración de los medidores de Humedad para Cereales, Parte 1.
- **TERMISTORES, RTD, BALANZAS**, Cole-parmer lanzetta-rengifo y Cia Ltda, p-1882-1887, 2001/02.
- Medidores y transmisores de humedad de 0 – 50°C.  
[www.testo.es/humedad.htm](http://www.testo.es/humedad.htm)
- Teoría e historia y justificación del secado y medición de humedad.  
<http://www.fao.org/inpho/vlibrary/x0028s/x0028s00.htm>
- Medidores directos de humedad.  
[www.valls-sa.com/varios/medidores.htm](http://www.valls-sa.com/varios/medidores.htm)
- Medidor de humedad en granos.  
[www.iaf.es/enciclopedia/rimasa/mg.htm](http://www.iaf.es/enciclopedia/rimasa/mg.htm)
- Generalidades del MOTOMCO.  
[www.asd-cr.com/ASD-PUB/Bo108/B8c2.htm](http://www.asd-cr.com/ASD-PUB/Bo108/B8c2.htm)

- Termometría para plantas de silo.

[http://www.secoin.com.uy/catalogos/secoin\\_silos.htm](http://www.secoin.com.uy/catalogos/secoin_silos.htm)

## **ANEXOS**

### **Anexo A. MEDIDA DE HUMEDAD DE GRANO**

R.G. Mutters

#### **Métodos para Medir el Contenido de Humedad**

Los métodos para determinar el contenido de humedad (CH) del grano de arroz pueden dividirse en dos grandes categorías: directos e indirectos.

Los métodos directos determinan el contenido de agua extrayendo la humedad. Por ejemplo, el método de horno evapora la humedad del grano y determina el volumen de agua por la pérdida de peso. Los métodos indirectos, en contraste, requieren la medida de una propiedad eléctrica del grano, conductancia o capacitancia. Se considera que los métodos directos proporcionan una verdadera medida del contenido de humedad. Son los empleados para calibrar los métodos indirectos que son más prácticos y más rápidos.

#### **Metodos de medicion del contenido de humedad:**

Medición Directa

Reacción Química

Calentamiento (horno)

Destilación

Radiación infrarroja

Radiación del microonda

**Medición Indirecta:**

Resistencia

Capacitancia

Humedad relativa

**Métodos directos**

**Reacción química.** El método más exacto consiste en extraer el agua químicamente. Brevemente, el método químico depende de la reacción de yodo con agua en la presencia de dióxido de azufre. Raramente se usa porque es costoso y consume mucho tiempo.

Calentamiento (horno). Después de un tiempo recomendado en el horno a una temperatura de 266°F, para arroz, el grano ha perdido la mayor parte del agua. El volumen de humedad del grano se determinado restando el peso del grano seco del peso de la muestra antes del secado en el horno.

Destilación. Las muestras de grano de tierra son mixtas con toluene y hervido. El agua se cae como un vapor; se coge y el volumen determinó que permite determinar el volumen de humedad del grano.

Infrarrojo y radiación microonda. Se usan infrarrojo y energías del microonda para evaporar el agua en una muestra de grano. Medida de humedad basada en cualquier tipo requiere el uso de muestras de tierra.

### **Métodos indirectos**

**Resistencia.** Este tipo de medidor de humedad mide la resistencia eléctrica ofrecida por una muestra de grano ante una corriente eléctrica conocida. El valor de la resistencia es una medida indirecta del contenido de humedad. Una muestra de grano se pone entre dos electrodos en una célula de condensación. La muestra debe comprimirse a un valor conocido y constante para medidas exactas. Luego debe hacerse una corrección por temperatura del grano.

**Capacitancia.** Se hace pasar una muestra a través de un conducto (cilindro) cuyas paredes son las placas de un condensador activadas por una corriente de alta frecuencia. Se requieren pesaje y correcciones precisas para temperaturas diferentes a los 77°F con el objeto de obtener medidas exactas. Se necesita una carta de calibración para cada tipo de grano. Los medidores por Capacitancia generalmente son más exactos cubriendo un rango más ancho humedad que los medidores de resistencia. El medidor de humedad Motomco es un ejemplo de este tipo de medidor.

**Humedad relativa.** Este tipo de medidores mide la humedad relativa (HR) en el espacio aéreo entre los granos. La HR del espacio que rodea los granos en una

muestra depende del contenido de humedad del grano. Se usan varios tipos de higrómetros para medir la HR. Se requiere corrección por temperatura. La exactitud de la medida requiere la una distribución uniforme de humedad a lo largo de la muestra. Por consiguiente, se necesitan de 1 a 2 horas para alcanzar el estado de equilibrio antes de que las medidas lleguen a ser confiables.

### **Fundamentos del Muestreo**

Al comprar o vender, la medida de la humedad del arroz se determina mediante muestras proporcionadas para tal propósito. Sin embargo para un almacenamiento seguro, es esencial saber el volumen de humedad más alto en cualquier parte de la masa de grano guardada, a cualquier situación, y en cualquier momento dado. Es importante anotar que la actividad de los insectos y los hongos pueden aumentar significativamente el volumen de humedad del arroz guardado. Así, las áreas pequeñas, localizadas de infestación pueden comenzar deterioro de la parte no infestada que conllevaría pérdidas considerables. Por esta razón, deben tomarse muestras individuales periódicamente de diferentes sitios de la masa del grano y determinar el contenido de humedad separadamente. El registro del contenido de humedad del grano almacenado, basado en muestras representativas puede indicarnos o no, el verdadero riesgo del almacenamiento con precisión. El contenido de humedad de arroz en algunas áreas del contenedor puede diferir en uno o varios puntos porcentuales del mostrado por los registros. Porque aun cuando el arroz tenga un contenido de humedad uniforme y esté bien mezclado al empacarse, las diferencias de temperatura dentro de la masa del

grano, la actividad de los insectos, y crecimiento de moho pueden producir transferencia de humedad. Si arroz se almacena durante meses, es aconsejable tomar muestras periódicamente de diferentes lugares de la masa del grano y determinar el contenido de humedad y el posible daño debido a hongos.

#### Bibliografía

Brooker, D.B., F.W. Bakker-Arkema, y C.W. Vestíbulo. 1992. Secando y Almacenamiento de Granos y Oilseeds. Carro de mudanzas Nostrand Reinhold, Nueva York, NY.

Sauer, D.B., editor. 1992. Almacenamiento de Granos del Cereal y Sus Productos. Cuarta edición. Asociación americana de Químicos del Cereal, St. Paul, MN.

#### **ANEXO B. Fast "INSPECTOR - ACCURATE" Tests Anywhere**

#### **With The MOTOMCO Model 919 MOISTURE METER**



Designed specifically to meet the requirements of the grain trade, the Model 919 Moisture Meter is used for inspection of grain, rice and beans under the official standards of the United States.

The electronic measuring circuits are the ultimate in simplicity and are so designed that battery or line voltages, aging of components and variable climatic conditions do not affect their accuracy.

<b>For</b>	<b>Test</b>
Elevator Operators	
<ul style="list-style-type: none"><li>• Grain Processors</li><li>• Grain Inspectors</li><li>• Feed Mills</li><li>• Grain Merchants</li><li>• Rice Mills</li><li>• Soybean Processors</li><li>• Chemical Manufacturers</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Grains</li><li>• Rice</li><li>• Beans</li><li>• Granular Commodities</li></ul>

**ACCURACY WHEN AND WHERE IT COUNTS** - wet or dry, warm or cold, even newly blended - at country elevator or research lab you can be sure with the 919 meter.

**FAST OPERATION** - less than one minute per test - no warm-up period required.

**TEST CELL** accommodates full 250 gram sample for maximum accuracy of results - test cell is pivoted for rapid removal of sample.

**CENTER POST ELIMINATES TEST WEIGHT CORRECTION** - the only electronic moisture meter equipped with patented center post to compensate for bushel weight variation, packing and leveling of sample.

**DUMP CELL** contains butterfly mechanism (activated by release knob) to provide the same uniform distribution of all samples tested in the test cell.

**PRECISION DRUM DIAL** with large easy-grip control.

**BUILT FOR YEARS OF SERVICE** - features precision built parts, rugged construction and simplicity of electronic circuitry - fast factory service always available at minimum charges. Lightweight and portable. Operates on 110 AC current. Battery models available on special order.

**CALIBRATION CHARTS** - The calibration charts furnished with the meter are prepared by U.S.D.A.'s inspection points. Charts furnished for grains, beans and rice are based on calibrations prepared by the Grain Division, Agricultural Marketing Service, U.S. Department of Agriculture and are as used in official inspection of these commodities.

## Anexo C. MOISTUREMETER



- 5 Different Needle Electrodes Available Optionally - For application versatility
- 12 Different Sensitivity Modules Available Optionally - For high to low range sensitivity
- Rechargeable Ni-Cad Batteries - Eliminates costly battery replacement
- Zero Point Adjustment Knob
- Furnished with Carrying Case, Power Cord, Transformer Plug-in Charger, Manual

## **General Description**

The Model G9 is a battery operated, hand held moisture meter designed for laboratory or in-plant test conditions. The G9 can test materials with a fairly constant bulk density and a consistent change of radio frequency properties with change in moisture content. These materials include semisolids; powdered, granular, or textile materials; and pliable sheets in rolls or stacks.

Operating on the radio frequency power loss absorption principle, which is a patented feature of Moisture Register Products, the G9 projects an RF field into the test area. This RF field extends approximately three inches from the G9's electrode needles. Any material containing moisture will absorb part of this current and cause a change in the meter readings. The meter reading is converted into moisture content by referring to a calibration curve established for the material being tested.

The G9 consists of a needle electrode assembly, which connects to a sensitivity module, which is connected to the meter by a three foot cable. The molded plastic handle contains a spring loaded switch bar for momentary testing, while the On-Off switch permits a series of tests.

Tests can be made by inserting the needles directly through a sack, or between layers of paper or other stacks of soft material. Greater accuracy is achieved by measuring a large volume of sample.

The Model G9 is normally furnished with the proper sensitivity modules which are pre-selected to cover the desired range of moisture contents for the material being tested. Any of 12 modules can be added as use of the instrument is extended to new material and ranges.

### **Interchangeable Sensitivity Modules**

The use of solid state sensitivity modules gives the G9 a broad moisture range capability. The modules permit more sensitivity in low moisture ranges as well as the ability to check high moisture content of up to 80% on some materials. Twelve different sensitivity modules are available, each with varying degrees of sensitivity. Beginning with the highest sensitivity (for very low moisture content), the modules available are: 450, 400, 250, 150, 100, 070, 050, 040, 030, 025, 020, and 010. The 010 is the least sensitive module, and in most cases is used in high moisture applications.

### **Calibration**

A calibration curve must be prepared for the Model G9 by taking dial readings on several samples having different moisture contents spaced throughout the desired range. The actual moisture contents of the samples are determined by oven, distillation, or other standard methods. These percentages and dial readings are plotted on a graph and the calibration curve is drawn.

### **Needle Electrodes**

The needle electrode consists of two tapered stainless steel needles. Each needle has a 3/16 inch diameter, and they are mounted 3/4 inch apart on a Teflon plastic mounting block. Five different needle assemblies are available:

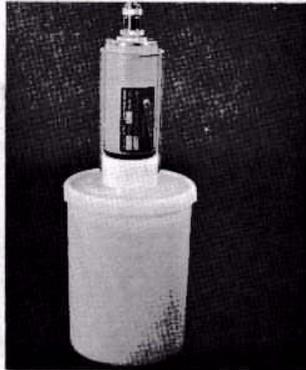
- No. 2 Assembly - 2 in. long needles
- No. 4 Assembly - 4 in. long needles
- No. 6 Assembly - 6 in. long needles

- No. 12 Assembly - 12 in. long needles
- No. 5/16 Assembly - 5/16 in. long needles

The long needles test and average more sample and yield steeper curves. Short needles permit tests on thinner or smaller samples.



**IN DRUMS**



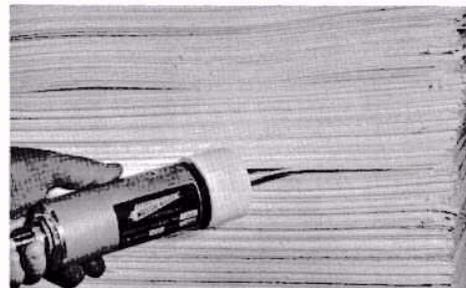
**IN TESTING CONTAINER**



**IN BINS**



**TROUGH BAGS**



**IN STACKS**



**IN LIQUIDS**



**IN BALES**



**IN SOFT FIBERS**

### **Free Sample Testing**

An Application Data Sheet should be filled out and sent to us along with representative samples of the materials you wish to test. Our laboratory will make the necessary tests, determine the most suitable sensitivity module for your material and moisture range, and prepare a checkpoint calibration curve. We do this to facilitate your purchase of a Model G9, and there is no charge to you for this service.

### **Additional Features**

- Special Battery Check Scale - Eliminates errors due to weak batteries.
- Sensitivity Multiplier Switch - Achieves greater accuracy in lower moisture ranges;  
increases meter sensitivity by four times.
- Calibration Standard - Verifies instrument calibration.

Shipping Weight: 15 lbs.

## Anexo D. ESPECIFICACIONES DEL MULTÍMETRO UTILIZADO

### Seguridad y conformidad con las normas

Tensión máxima entre cualquier terminal y tierra de protección	1000 V CC o CA RMS
Conformidad	Cumple con ANSI/ISA-S82.01-94, CSA C22.2 No 1010.1-92 a 1000 V de sobretensión, categoría III, Grado de polución 2*.
Certificaciones (enumeradas y en trámite)	CSA según norma CSA/CAN C22.2 No. 1010.1-92 UL según norma UL 3111 TÜV según norma EN 61010 Parte 1-1993
Protección contra impulsos momentáneos	8 kV máximo, según IEC 1010.1-92
⚠ Fusible de protección para entradas en mA o $\mu$ A	Fusible rápido de 0,44 A (44/100 A, 440 mA), 1000 V
⚠ Fusible de protección para la entrada en A	Fusible rápido de 11 A, 1000 V
Marcas	CE,  , UL y TÜV
*CAT III: SOBRETENSIÓN (Instalación) Categoría III, Grado de polución 2 según IEC1010-1 se refiere al nivel proporcionado de protección por tensión de resistencia al choque. El equipo de SOBRETENSIÓN CATEGORÍA III se trata de un equipo en instalaciones fijas. Algunos ejemplos incluyen los equipos de medición de electricidad y de protección primaria contra sobrecorriente.	

### Especificaciones básicas

Función	Rangos/Descripción
Tensión de CC	0 a 1000 V
Tensión de CA, RMS real	2,5 mV a 1000 V – ancho de banda de 100 kHz
Exactitud básica	Tensión de CC: 0,025 % Tensión de CA: 0,4 %
Corriente CC	0 a 10 A (20 A durante 30 segundos)
Corriente CA, RMS real	25 $\mu$ A a 10 A (20 A durante 30 segundos)
Resistencia	0 a 500 M $\Omega$
Conductancia	0 a 500 nS
Capacitancia	0,001 nF a 50 mF
Prueba de diodos	3,1 V
Temperatura	-200 °C a 1350 °C (-328 °F a 2462 °F)
Frecuencia	0,5 Hz a 1000 kHz
Intervalos de registro (LOGGING) (modelo 189 solamente)	Pueden almacenarse por lo menos 288 intervalos. Se agregan automáticamente hasta 700 valores de sucesos inestables (Véase AutoHOLD) a la memoria de LOGGING solamente para visualización por medio del software opcional para ordenadores. Si la señal es estable, se registrarán intervalos adicionales hasta 995.
Lecturas guardadas (SAVE) (modelo 189 solamente)	El usuario puede guardar hasta 100 lecturas en una memoria separada de la memoria de registro. Estas lecturas se pueden visualizar mediante VIEW MEM.

### Especificaciones detalladas de exactitud

La exactitud se especifica para un periodo de un año posterior a la calibración, a temperaturas de 18 °C a 28 °C (64 °F a 82 °F), con una humedad relativa de hasta el 90 %. Las especificaciones de exactitud se presentan como:

$$\pm ( [\% \text{ de la lectura}] + [\text{número de cifras menos significativas}] )$$

Las especificaciones de CA mV, CA V, CA  $\mu$ A, CA mA y CA A tienen acoplamiento de CA, están calibradas para leer el verdadero valor eficaz (rms) y son válidas desde el 5 % del rango hasta el 100 % de rango. El factor de cresta de CA puede ser de hasta 3,0 a plena escala y 6,0 a media escala, salvo los rangos de 3000 mV y 1000 V donde es de 1,5 a plena escala y 3,0 a media escala.

Función	Rango	Resolución	Exactitud				
			45 Hz-1 kHz	20-45 Hz	1 kHz-10 kHz	10 kHz-20 kHz	20 kHz-100 kHz
mV <sup>1,2</sup> CA	50,000 mV	0,001 mV	0,4 % + 40	2 % + 80	5 % + 40	5,5 % + 40	15 % + 40
	500,00 mV	0,01 mV	0,4 % + 40	2 % + 80	5 % + 40	5,5 % + 40	8 % + 40
	3000,0 mV	0,1 mV	0,4 % + 40	2 % + 80	0,4 % + 40	1,5 % + 40	8 % + 40
V <sup>1,2</sup> CA	5,0000 V	0,0001 V	0,4 % + 40	2 % + 80	0,4% + 40	1,5 % + 40	8 % + 40
	50,000 V	0,001 V	0,4 % + 40	2 % + 80	0,4 % + 40	1,5 % + 40	8 % + 40
	500,00 V	0,01 V	0,4 % + 40	2 % + 80	0,4 % + 40	Sin especificar	Sin especificar
	1000,0 V	0,1 V	0,4 % + 40	2 % + 80	0,4 % + 40	Sin especificar	Sin especificar
dBV	-52 a -6	0,01 dB	0,1 dB	0,2 dB	0,5 dB	0,5 dB	1,4 dB
	-6 a +34	0,01 dB	0,1 dB	0,2 dB	0,1 dB	0,2 dB	0,8 dB
	+34 a +60	0,01 dB	0,1 dB	0,2 dB	0,1 dB	Sin especificar	Sin especificar

1. Para el modo de 5.000 conteos, divida el número de cifras menos significativas (conteos) por 10.  
2. Una lectura residual de 8 a 180 cifras con los conductores en cortocircuito no afectará la exactitud enunciada por encima de un 5 % del rango.

Función	Rango	Resolución	Exactitud			
			45-1 kHz	20-45 Hz	1-20 kHz	20 kHz-100 kHz
$\mu$ A de CA	500,00 $\mu$ A	0,01 $\mu$ A	0,75 % + 20	1 % + 20	0,75 % + 20	6 % + 40
	5000,0 $\mu$ A	0,1 $\mu$ A	0,75 % + 5	1 % + 5	0,75 % + 10	2 % + 40
mA de CA	50,000 mA	0,001 mA	0,75 % + 20	1 % + 20	0,75 % + 20	9 % + 40
	400,00 mA	0,01 mA	0,75 % + 5	1 % + 5	1,5 % + 10	4 % + 40
A de CA	5,0000 A	0,0001 A	1,5 % + 20	1,5 % + 20	6 % + 40	No se aplica
	10,000 A <sup>1</sup>	0,001 A	1,5 % + 5	1,5 % + 5	5 % + 10	No se aplica

10 A continuos hasta 35 °C, menos de 10 minutos de 35 °C hasta 55 °C. Sobrecarga de 20 A durante 30 segundos como máximo.

Anexo E. CIRCUITO IMPRESO DE LA ETAPA DE MEDICIÓN

